



Interféromètre à conversion de fréquences ALOHA en bande L : intégration au réseau de télescopes CHARA

Julie MAGRI

Ludovic Grossard, François Reynaud, Marc Fabert, Laurent Delage (XLIM)

Jean-Michel Le Duigou (CNES), Rodolphe Krawczyk (TAS)



Laboratoire de recherche :

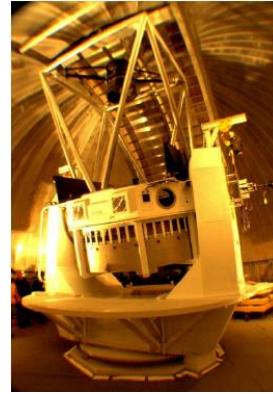


Thèse financée par :



Thèse en collaboration avec :





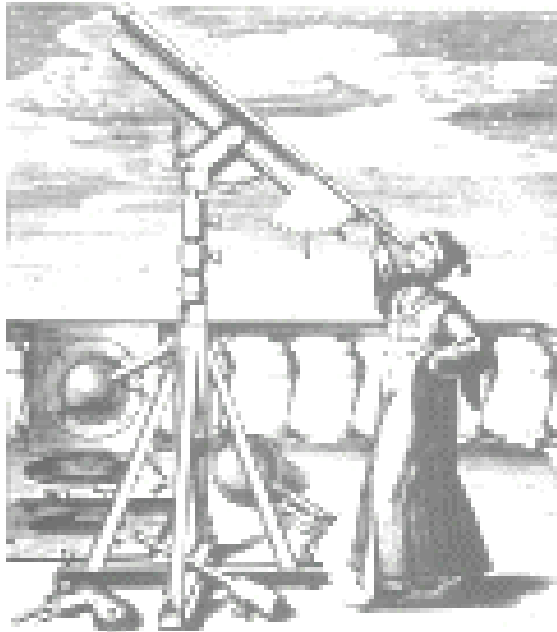
Introduction :

Pourquoi utiliser l'imagerie par un réseau de télescope ?



Évolution des moyens d'observations

Lunette de Galilée



XVI^e siècle

Canada-France-Hawaii Telescope
(Mauna Kea, Hawaii, USA)
D = 3,60 m



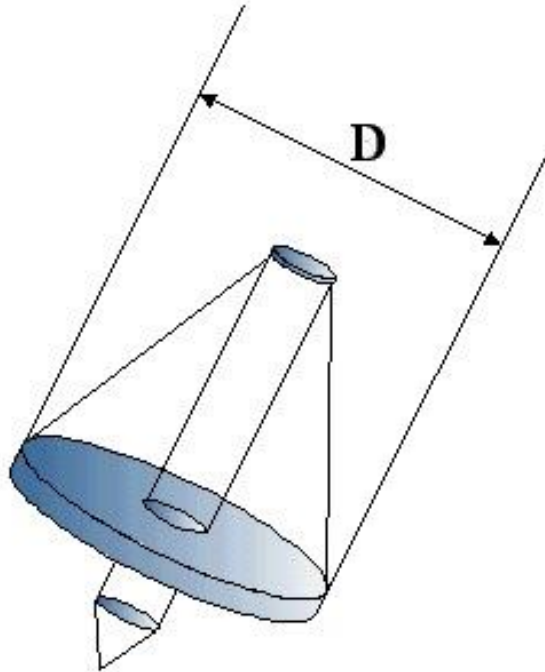
XX^e siècle

Very Large Telescope
Interferometer (VLT, Chili)
D = 8,20 m



XXI^e siècle

Télescope classique monolithique

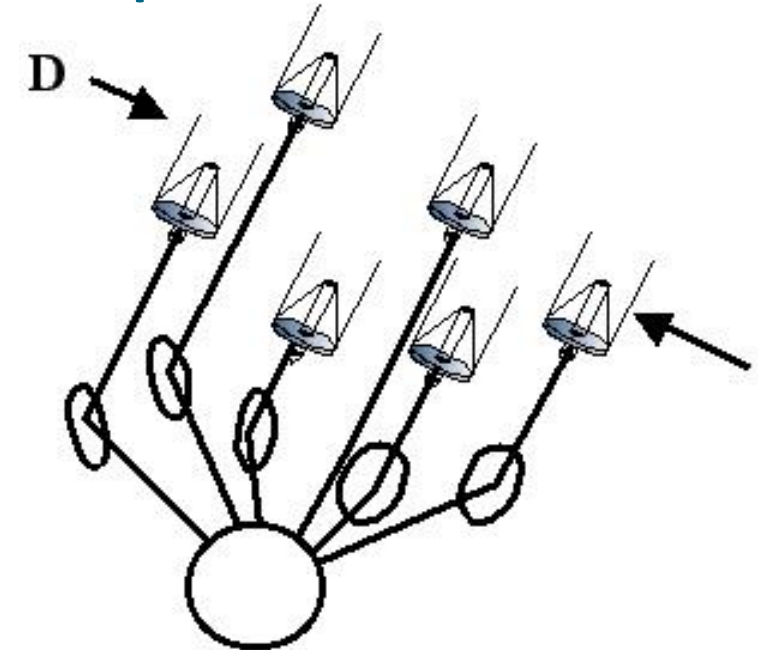


$D = 1-10 \text{ m}$

Petite résolution angulaire : 1 à 0,1 μrad

$$\text{résolution} \propto \frac{\lambda}{D}$$

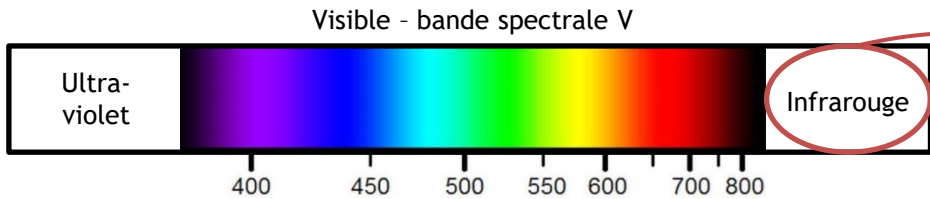
Utilisation d'un réseau de télescopes et de l'interférométrie



$D = 100-300 \text{ m}$

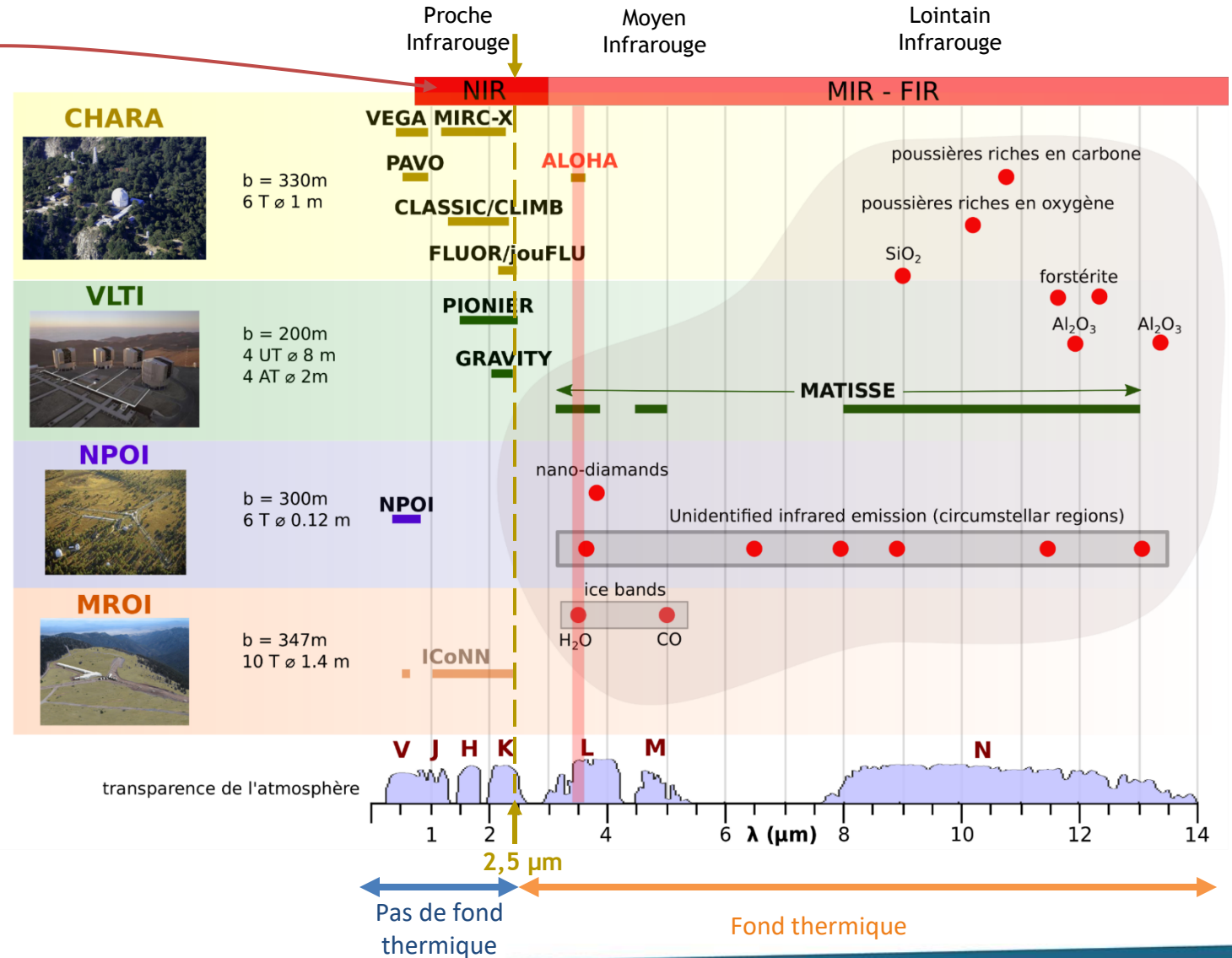
Meilleure résolution angulaire : 10 à 3 nrad

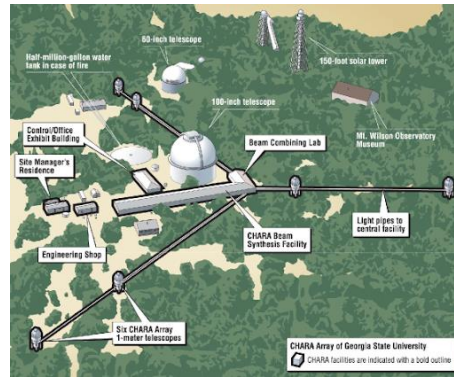
Instrumentes existants et bandes spectrales



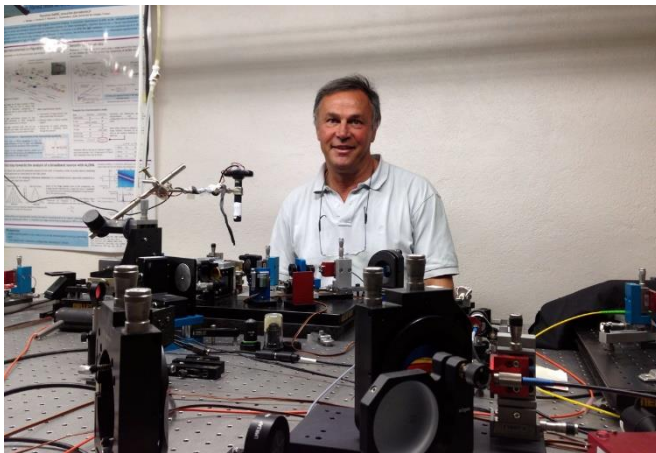
Sources intéressantes dans le MIR ;
Objets « froids » :

- Exoplanètes
- Young Star Objects
- Naines brunes
- Poussières
- Noyaux actifs de galaxies
- ...





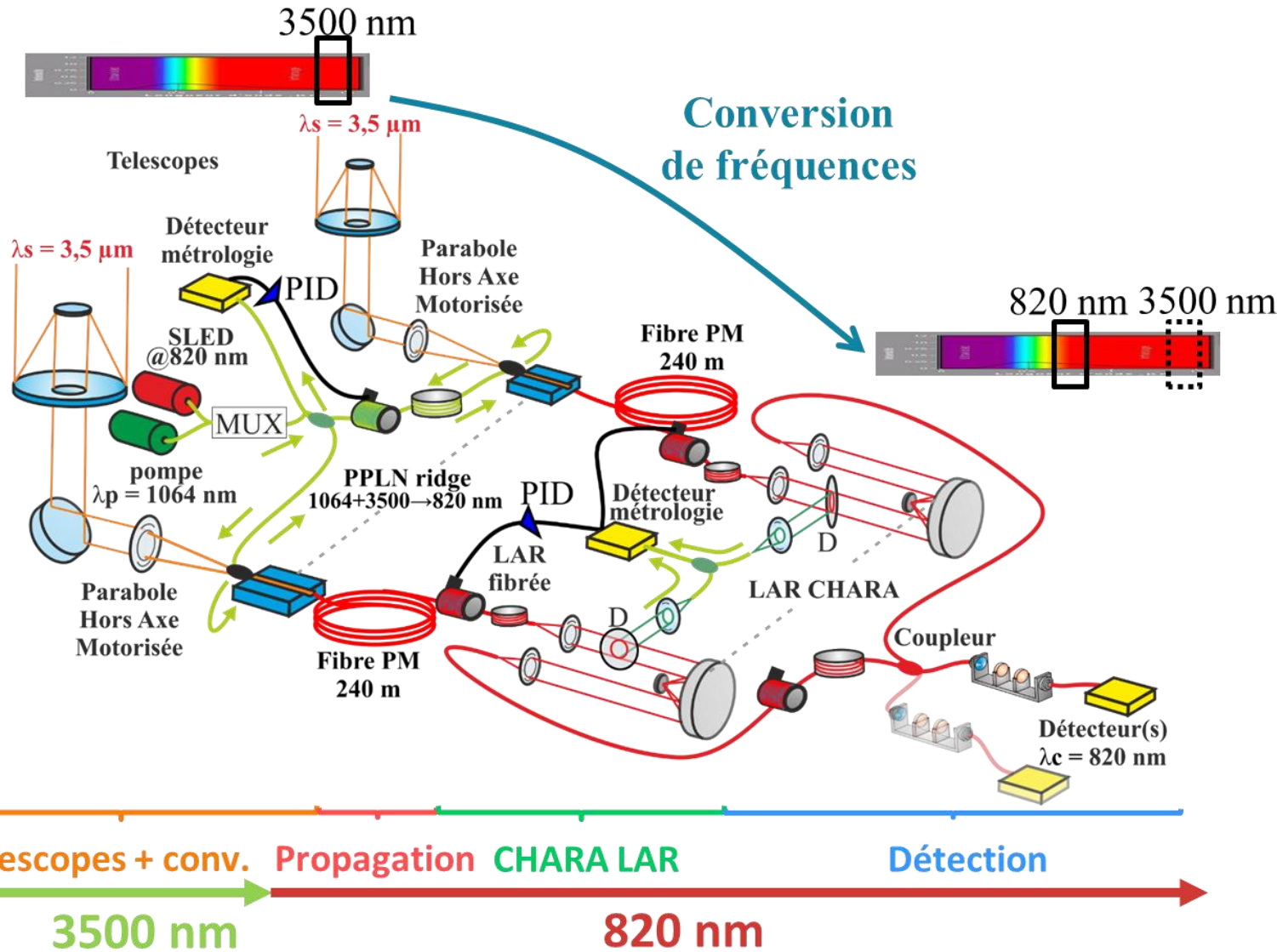
Une nouvelle alternative: Le mariage de l'astronomie haute résolution et de l'optique non linéaire



Aloha



Le projet ALOHA (Astronomical Light Optical Hybrid Analysis)

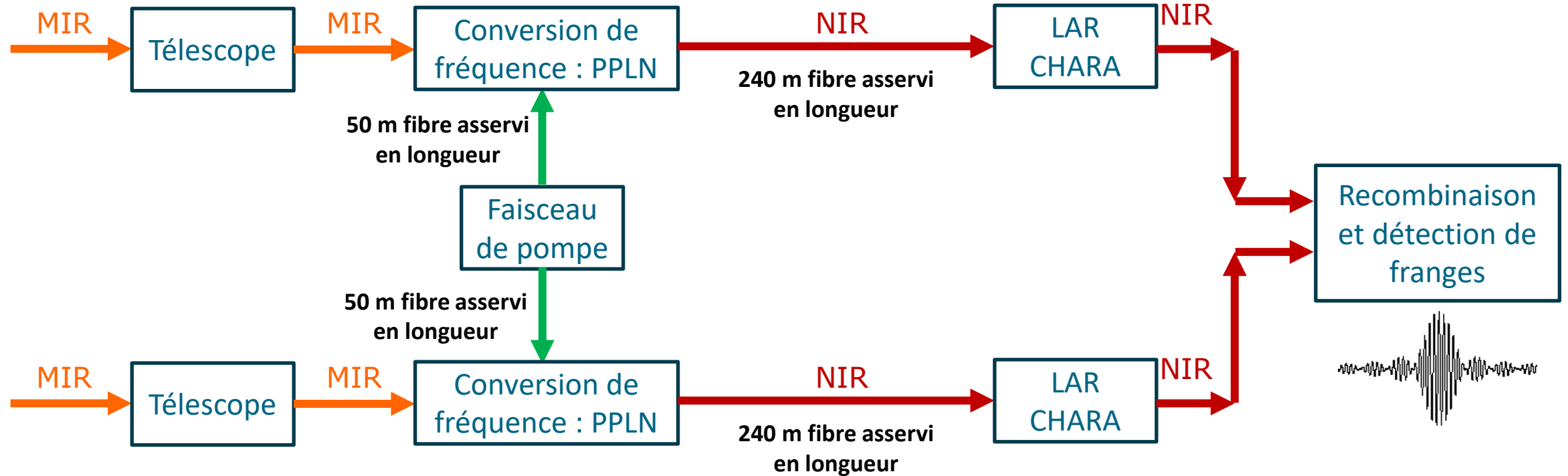


Association de l'optique non linéaire et l'optique guidée pour l'astronomie haute résolution

Interféromètre fibré et asservi à conversion de fréquences dans le moyen infrarouge

→ application en bande L à 3,5 μm au réseau de télescopes CHARA

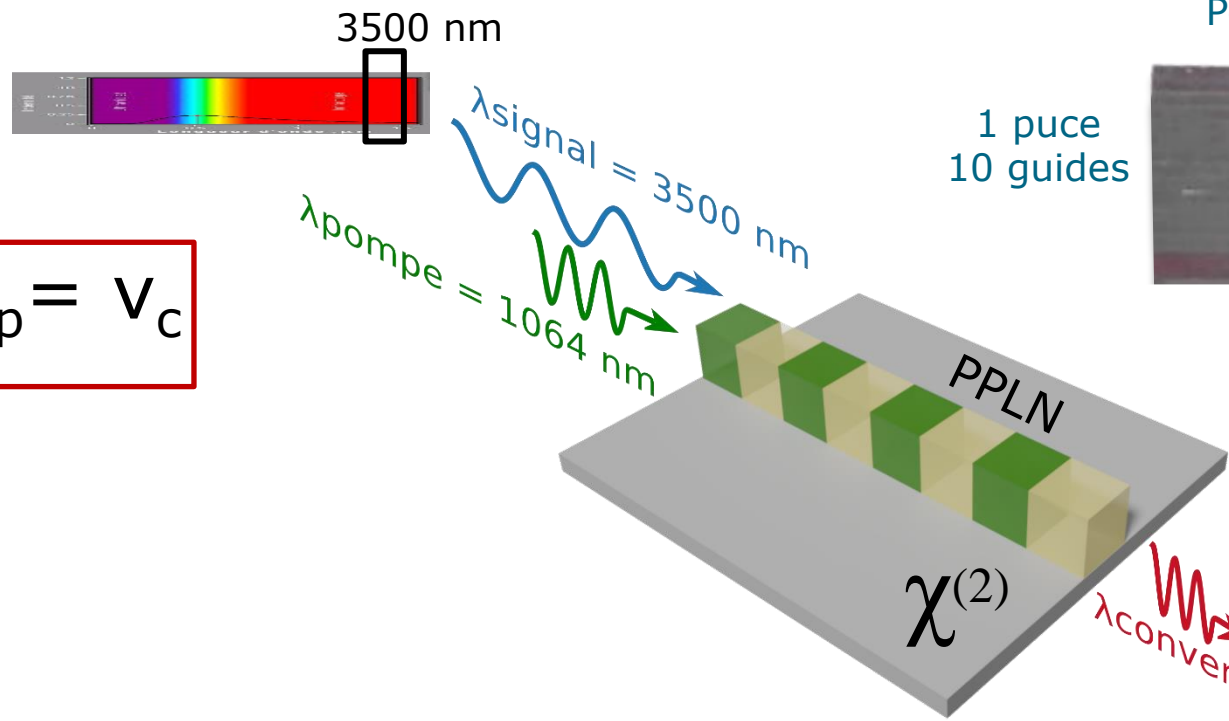
Interféromètre **fibré** et **asservi** à **conversion de fréquences** dans le MIR → application en bande L à $3,5 \mu\text{m}$ au réseau de télescopes CHARA (CA, USA)



LAR : ligne à retard
PPLN : Periodically Poled Lithium Niobate

Optique non linéaire : processus de sommes de fréquences

$$V_s + V_p = V_c$$

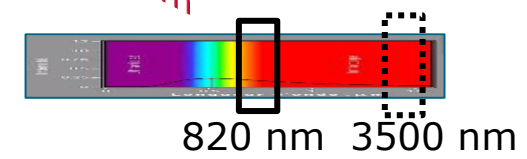
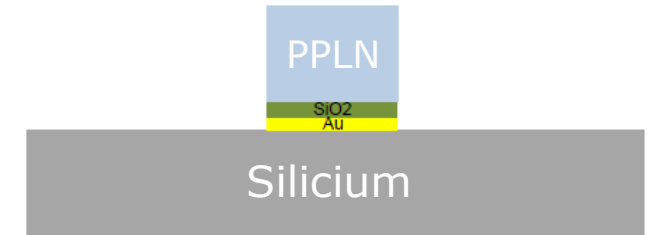


Periodically Poled Lithium Niobate

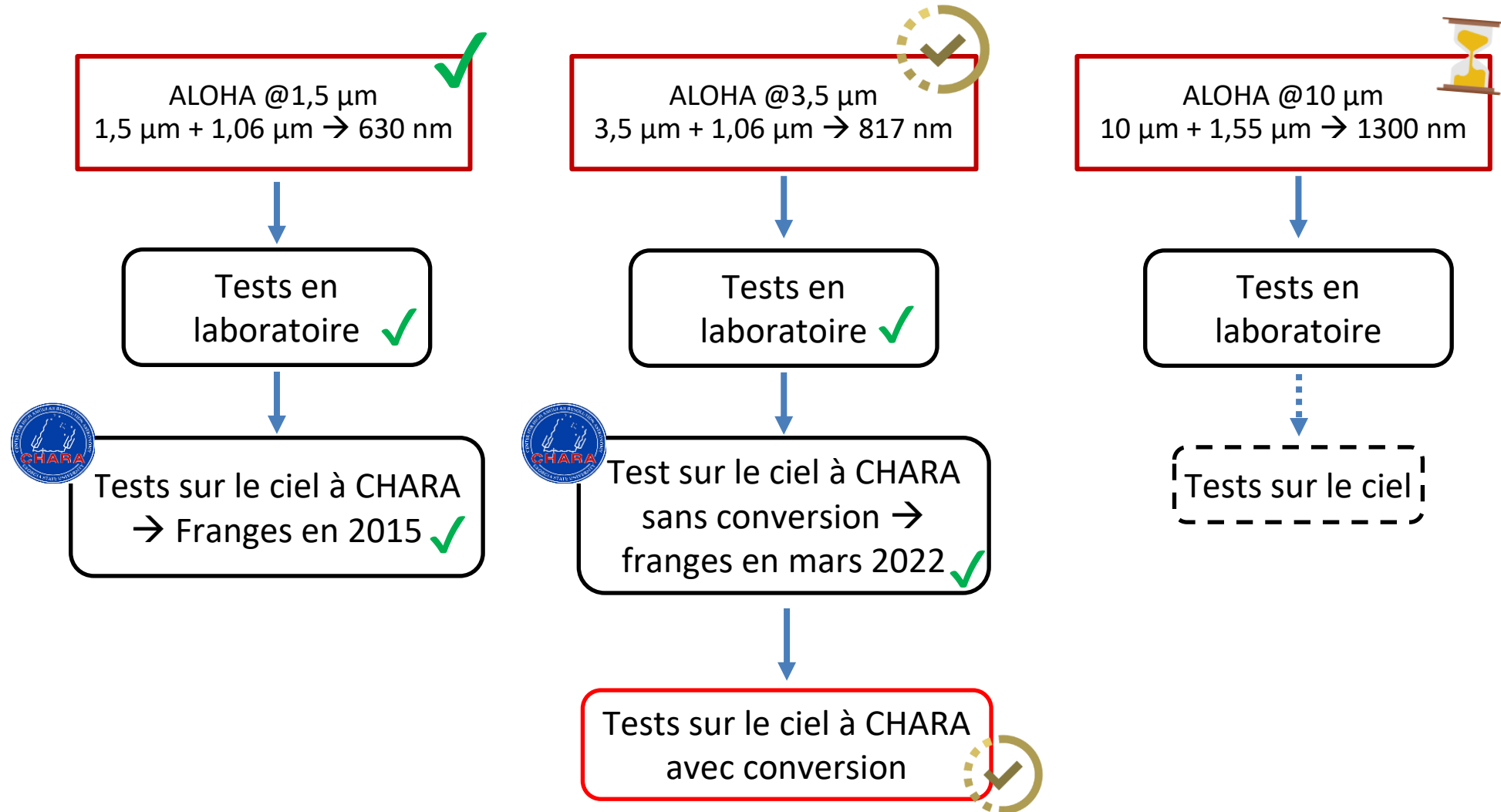


1 puce
10 guides

Paramètres
des guides
variables

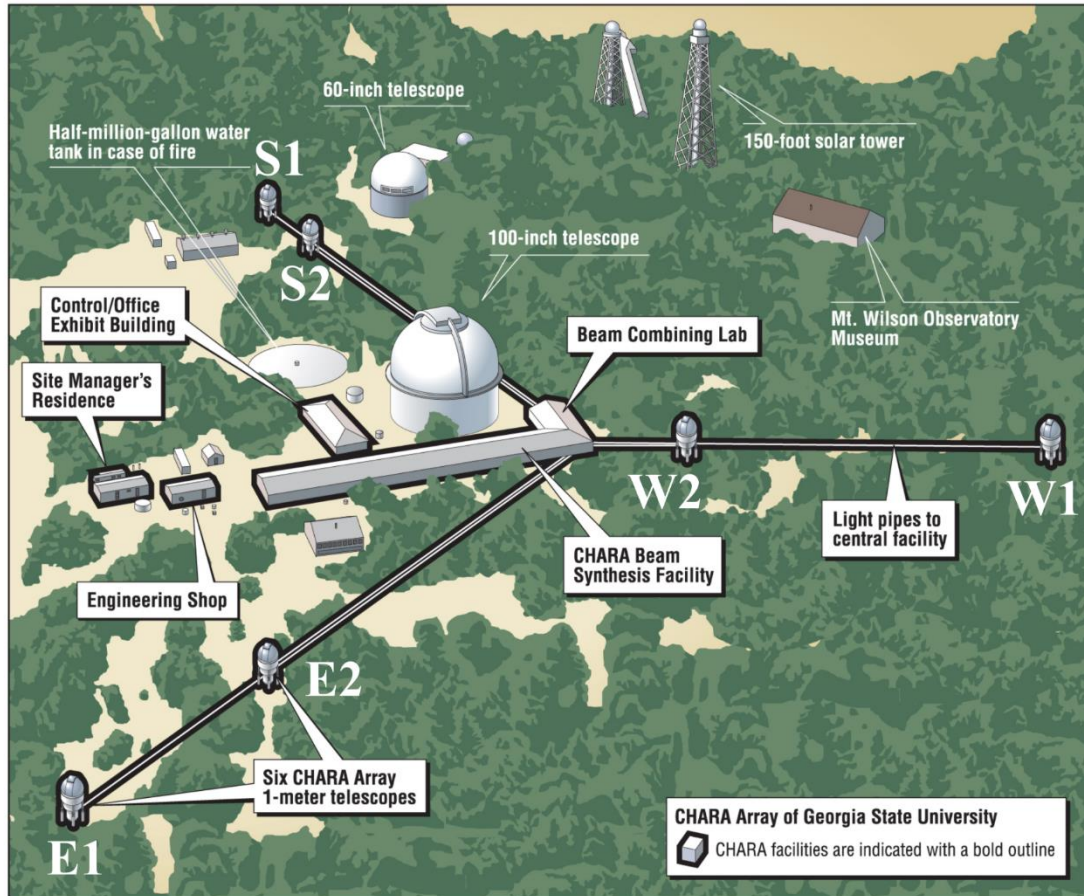


Stratégie du projet ALOHA



Intégration de l'instrument ALOHA à CHARA

Le réseau de télescopes CHARA



Télescopes
S1 et S2

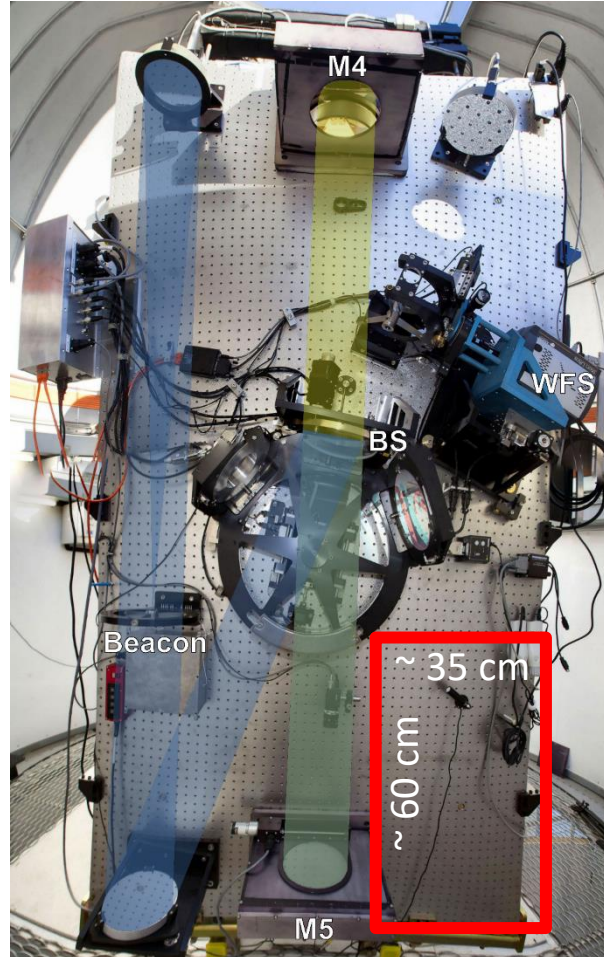
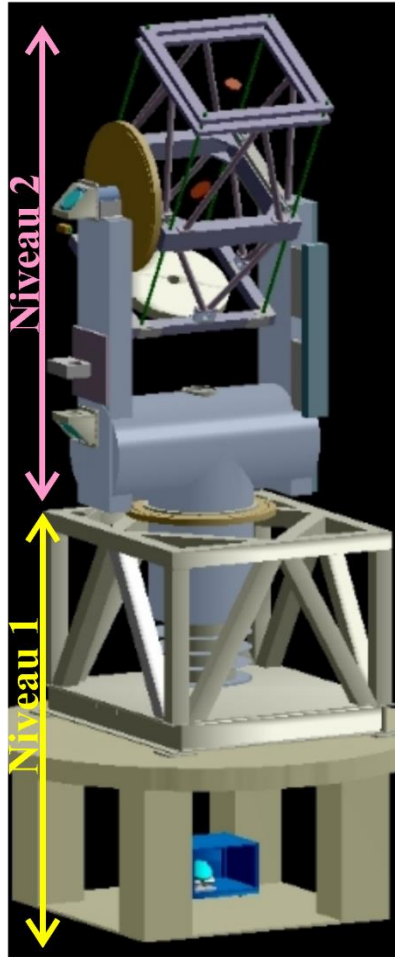
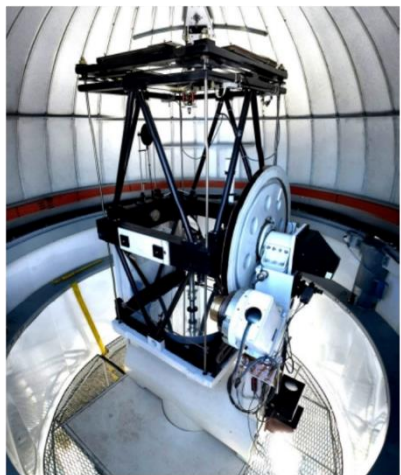


Réseau de télescopes CHARA :

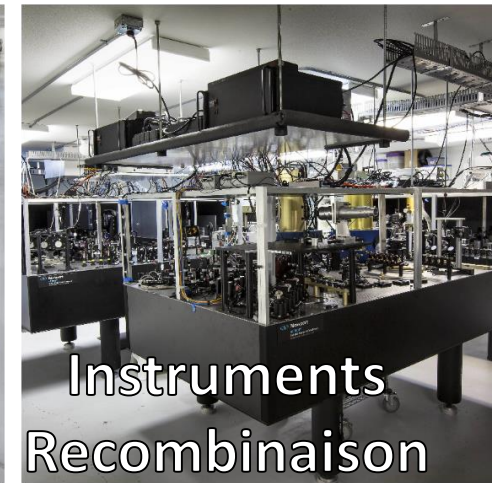
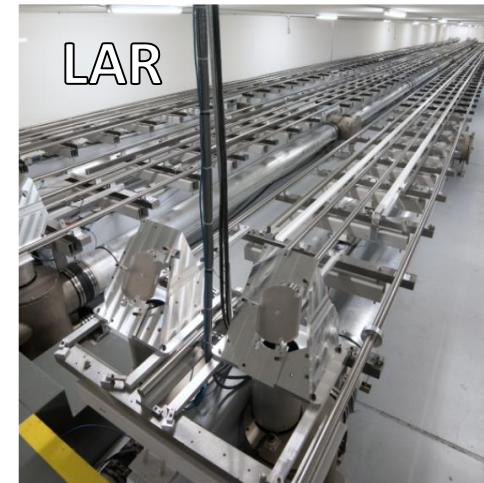
- Situé au Mount Wilson (USA, CA)
- 6 télescopes, miroir primaire $D = 1 \text{ m}$
- Ligne à retard (course $2 \times 45 \text{ m}$)
- Instrument le plus résolvant au monde ($D_{\text{max}} = 334 \text{ m}$, res. ang. = 3 nrad @ $1 \mu\text{m}$)
- $\lambda_{\text{max}} = 2,5 \mu\text{m}$ (Instrument FLUOR/jouFLU)

Le réseau de télescopes CHARA

Télescopes



Laboratoire de recombinaison des faisceaux



Nécessité d'adapté ALOHA pour CHARA



- Modules d'injection au niveau des télescopes
- Peu de place
- À la verticale

- Fibres optiques
- Asservissement des différences de longueur

- Modules de collimation
- Modules de réinjection



Installation des fibres optiques de pompe et de transport du signal

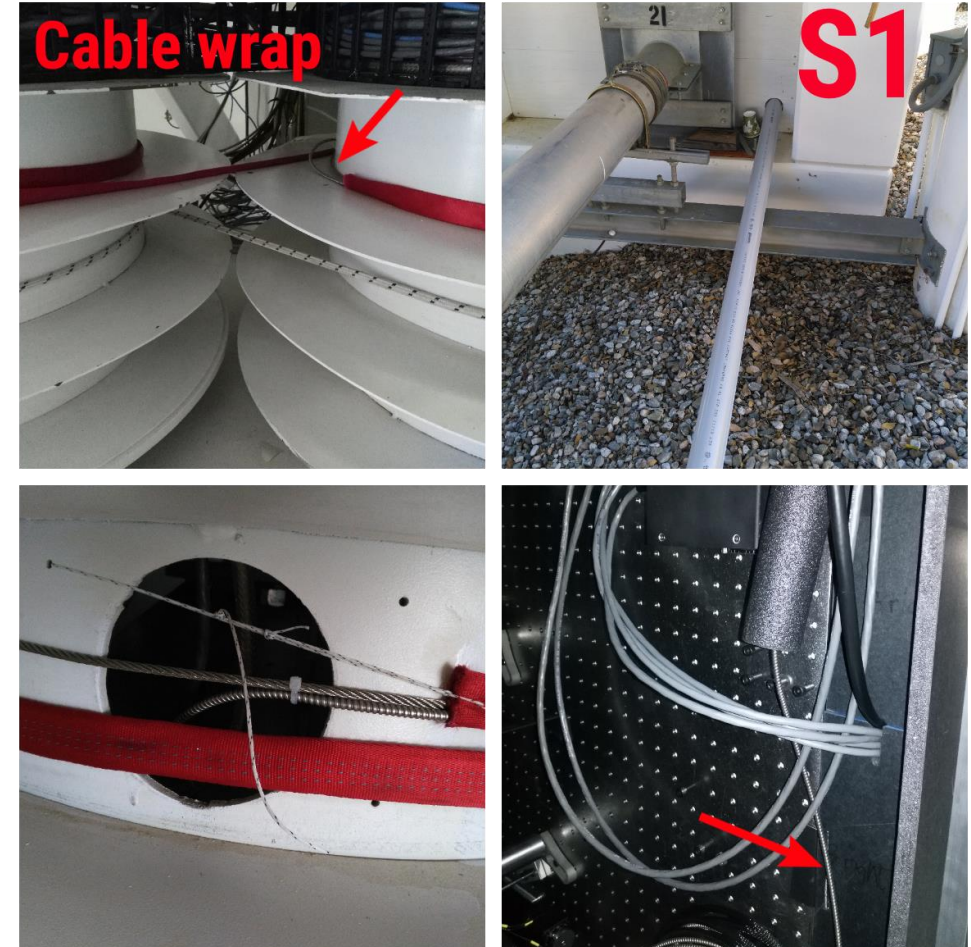
Passage des fibres entre le laboratoire de recombinaison et les télescopes S1 et S2



Conduit PVC

Fibre

Passage des fibres dans les télescopes



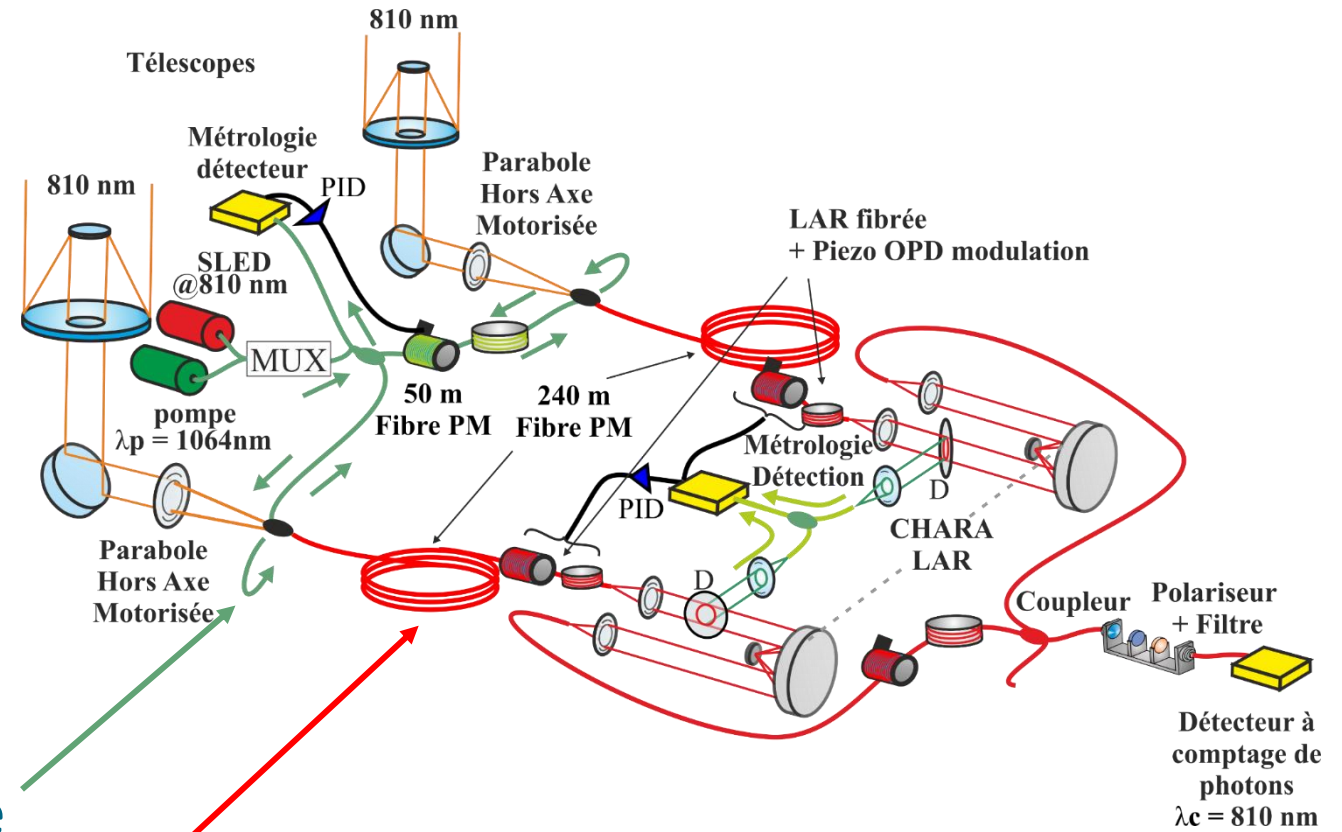
Nécessité d'asservir la différence de longueur des fibres

Les longueurs des fibres peuvent varier :

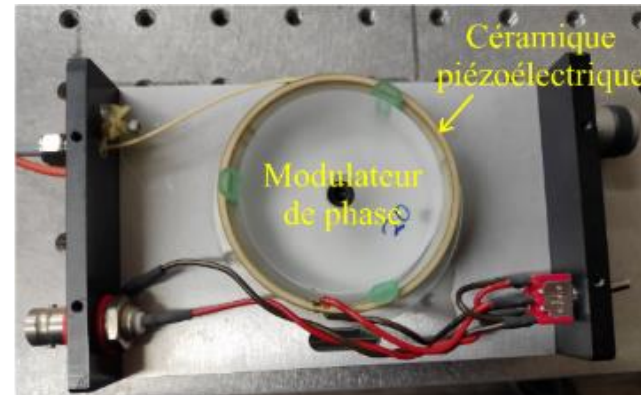
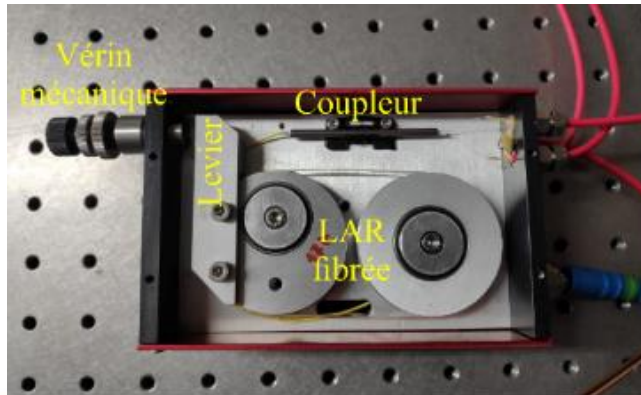
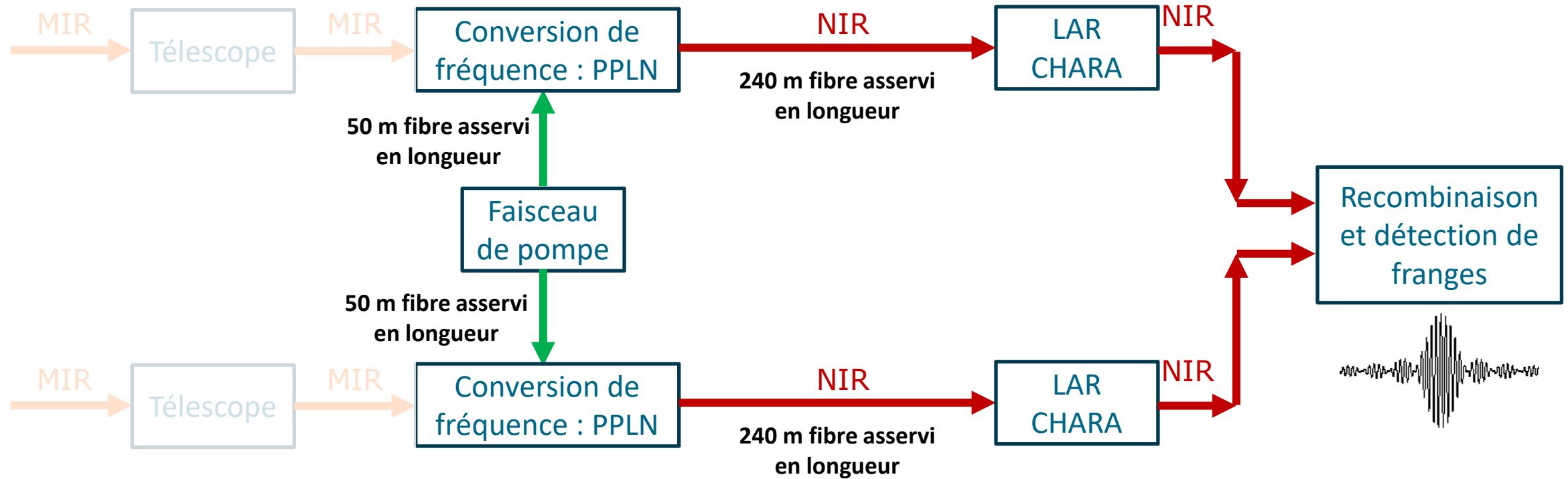
- stress thermiques
(températures extérieures varient beaucoup)
- stress mécaniques télescopes
- stress mécaniques divers

Nécessité d'**asservir** :

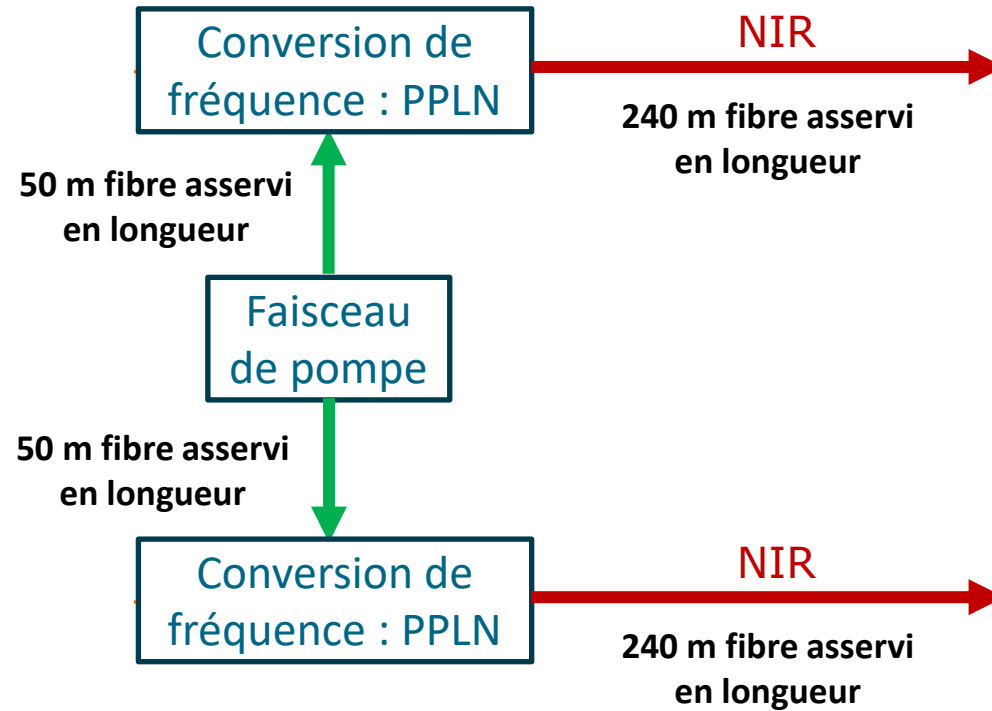
- fibres de 50 m transport laser de pompe
- fibres de 240 m transport lumière astronomique
(convertie ou non)



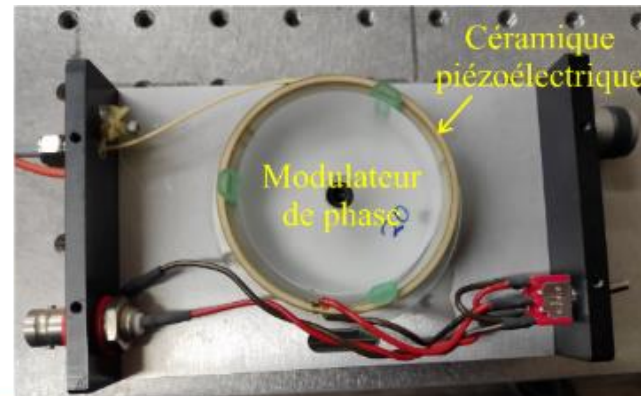
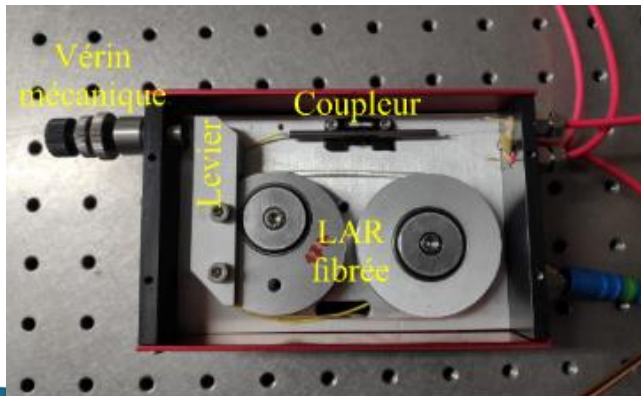
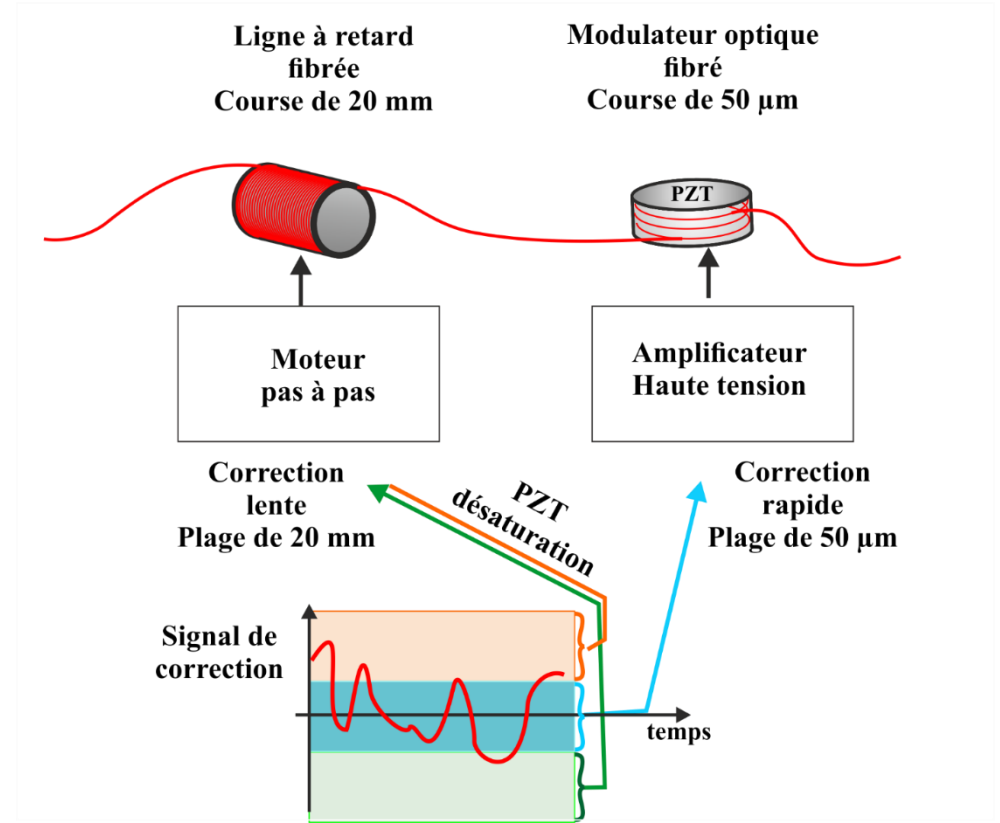
Nécessité d'asservir la différence de longueur des fibres



Nécessité d'asservir la différence de longueur des fibres

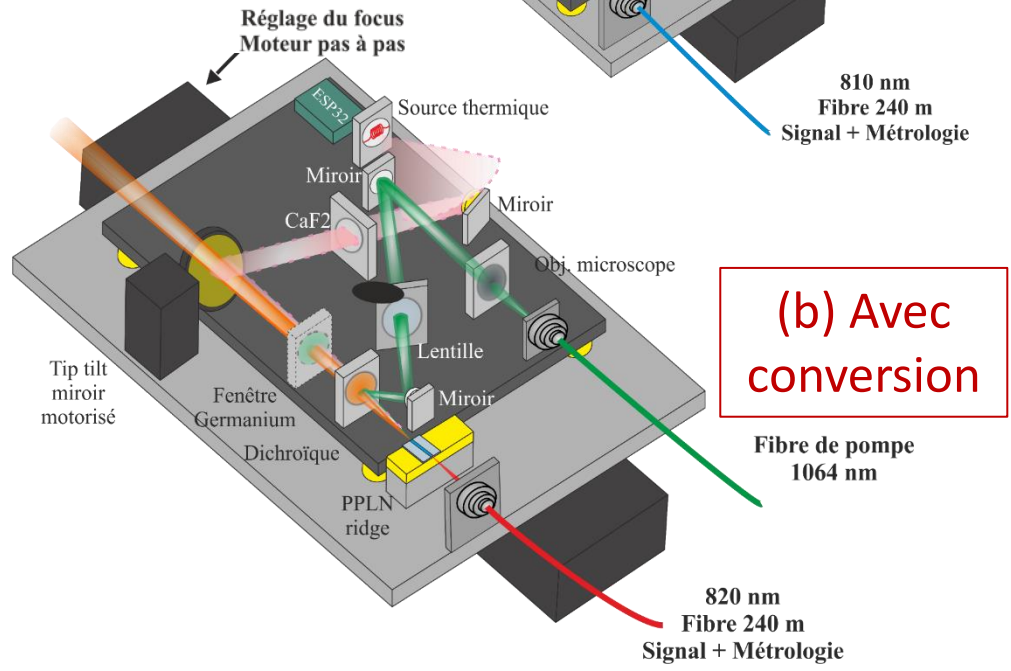
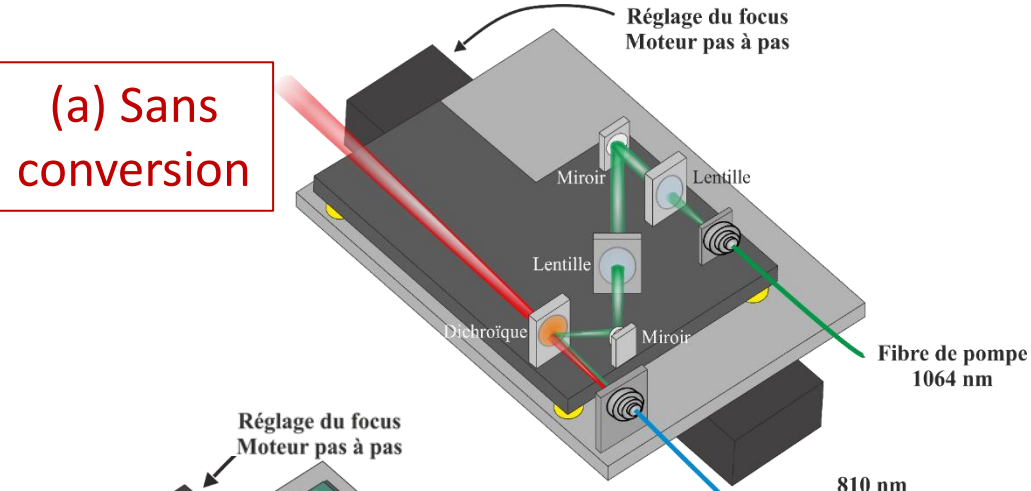


Plage de correction des actuateurs

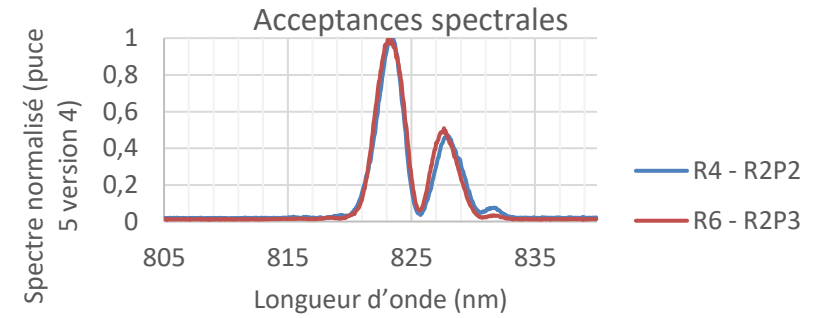
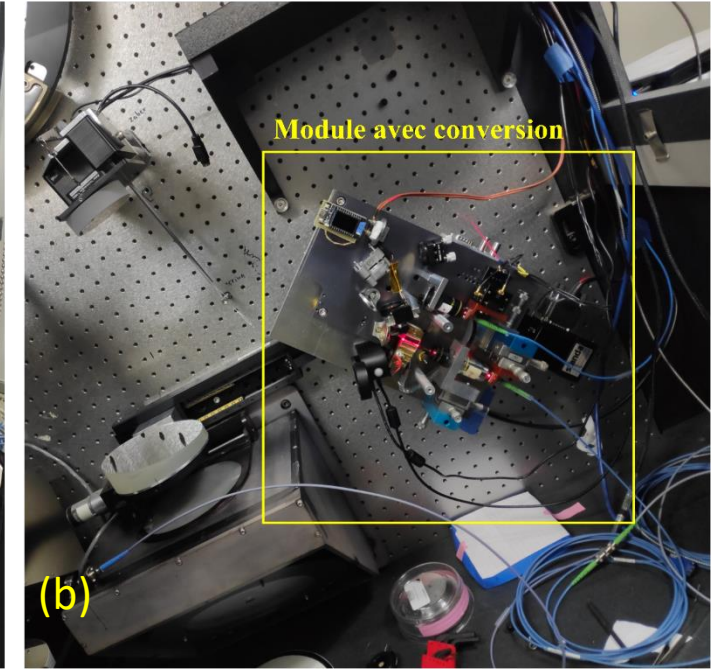
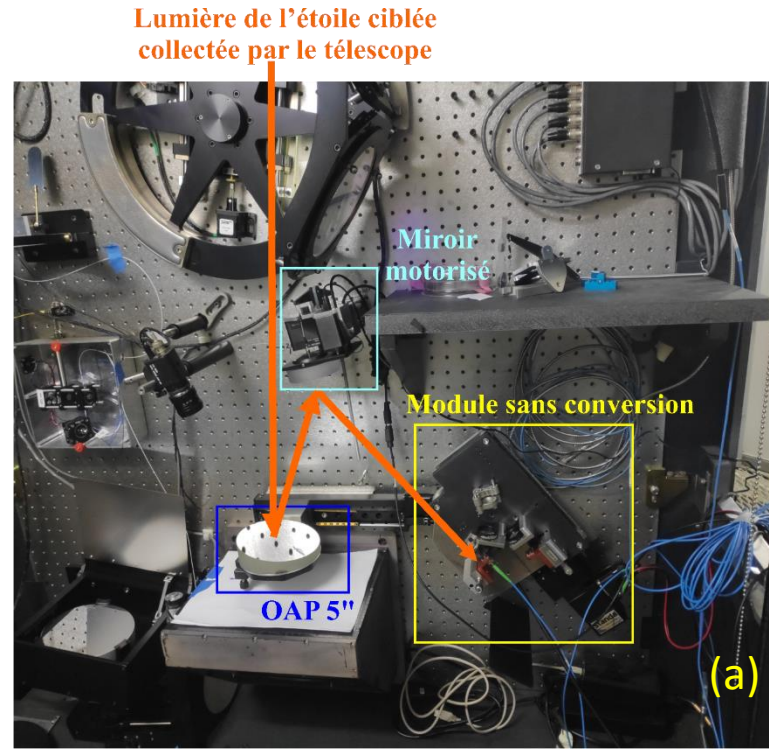


Modules d'injection dans les télescopes (avec et sans conversion)

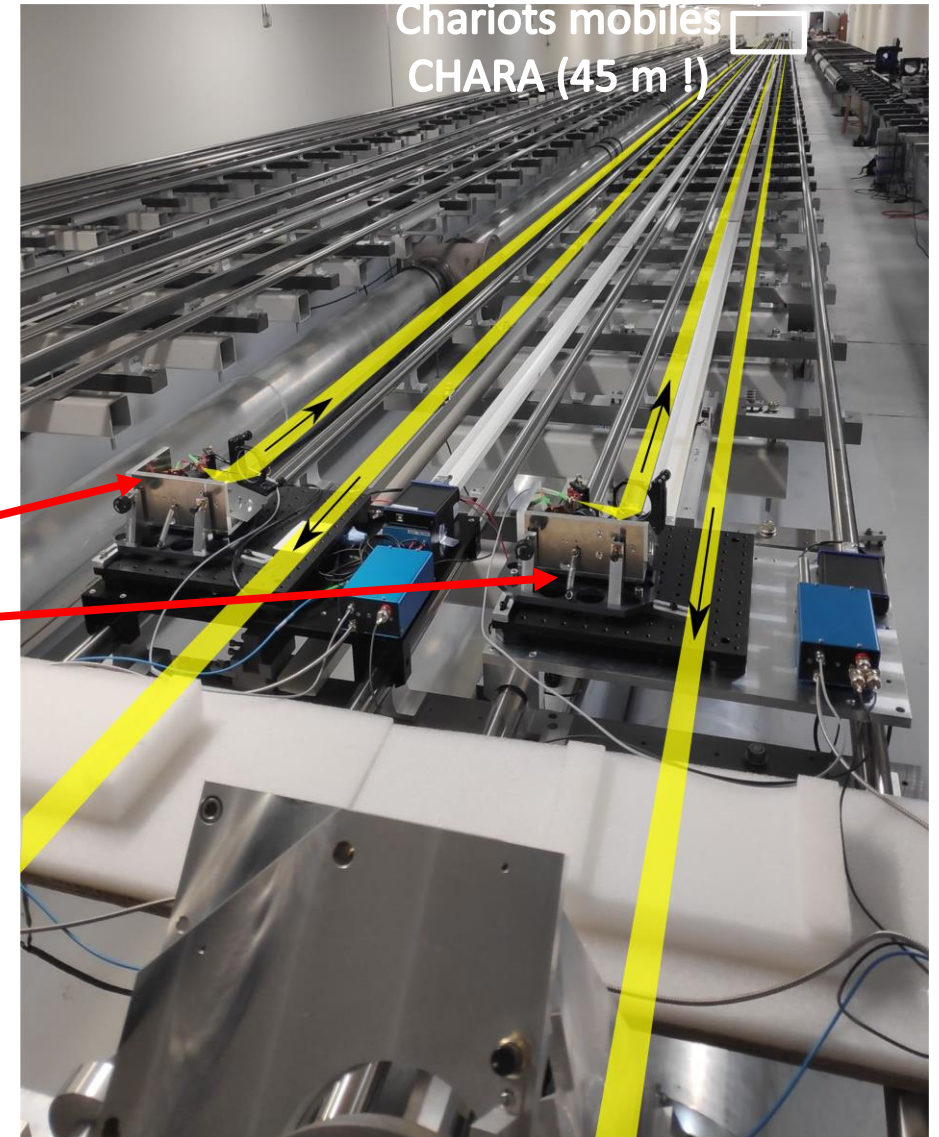
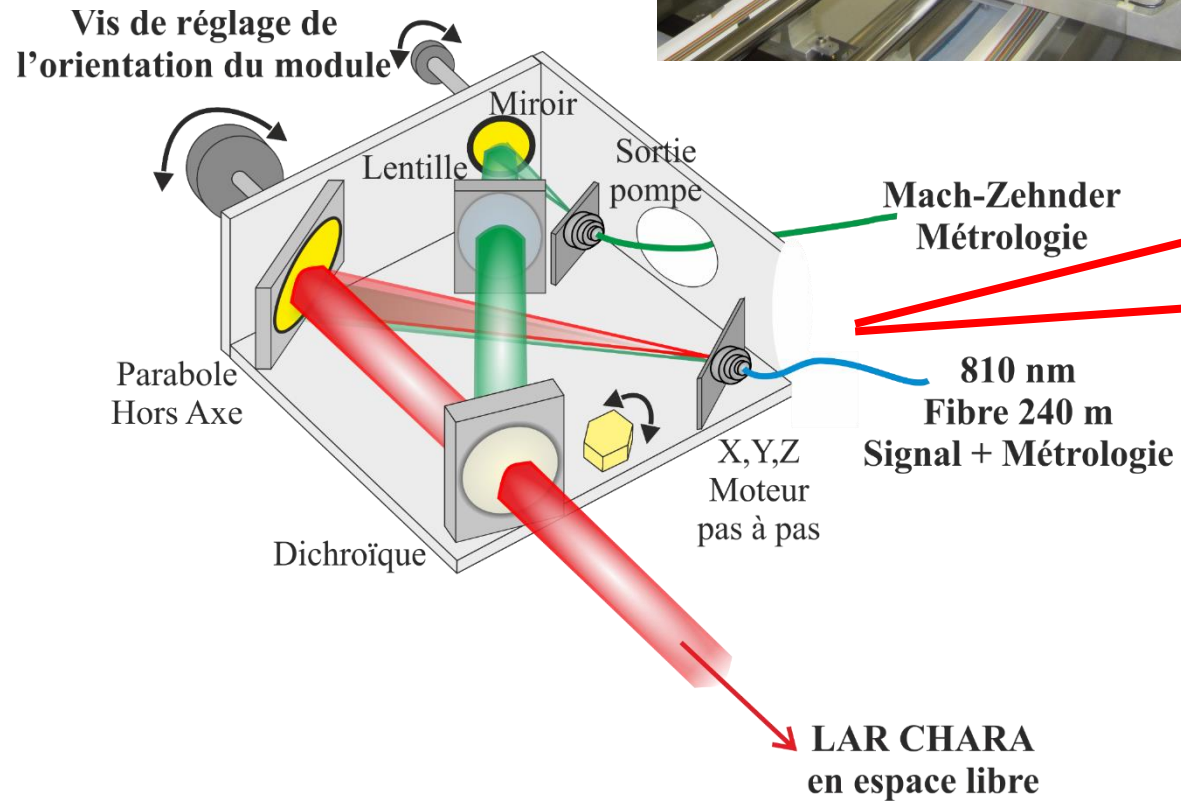
(a) Sans conversion



(b) Avec conversion



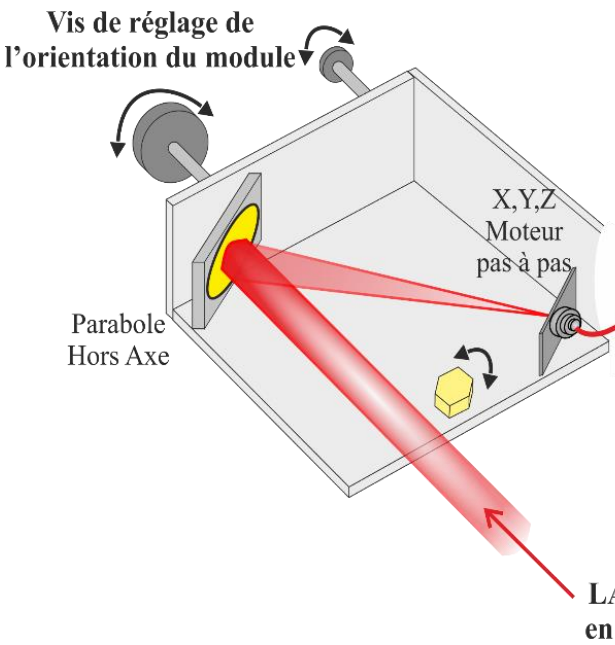
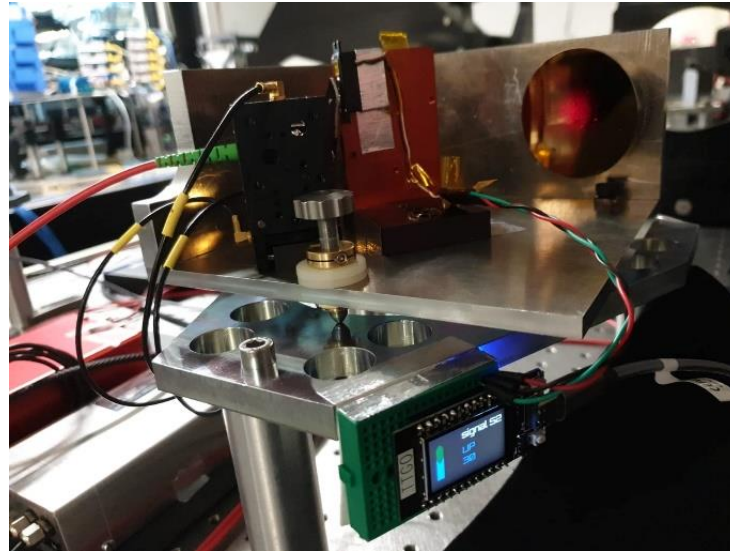
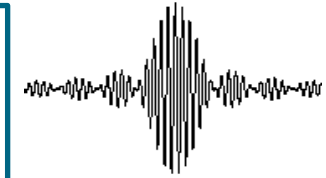
Modules de collimation (LAR CHARA)



Récupération de la lumière des LAR

Recombinaison

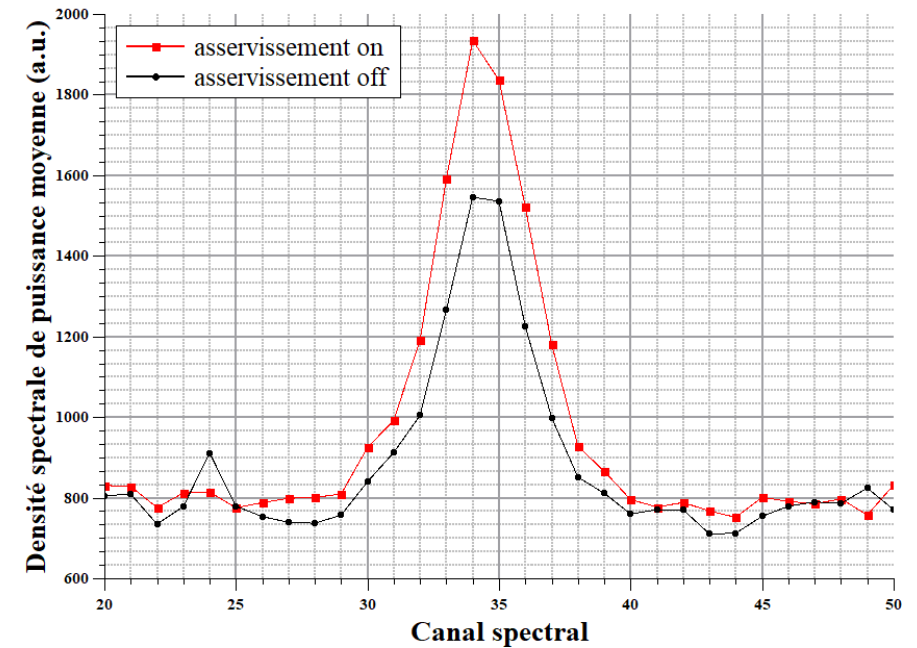
Détection en comptage de photons



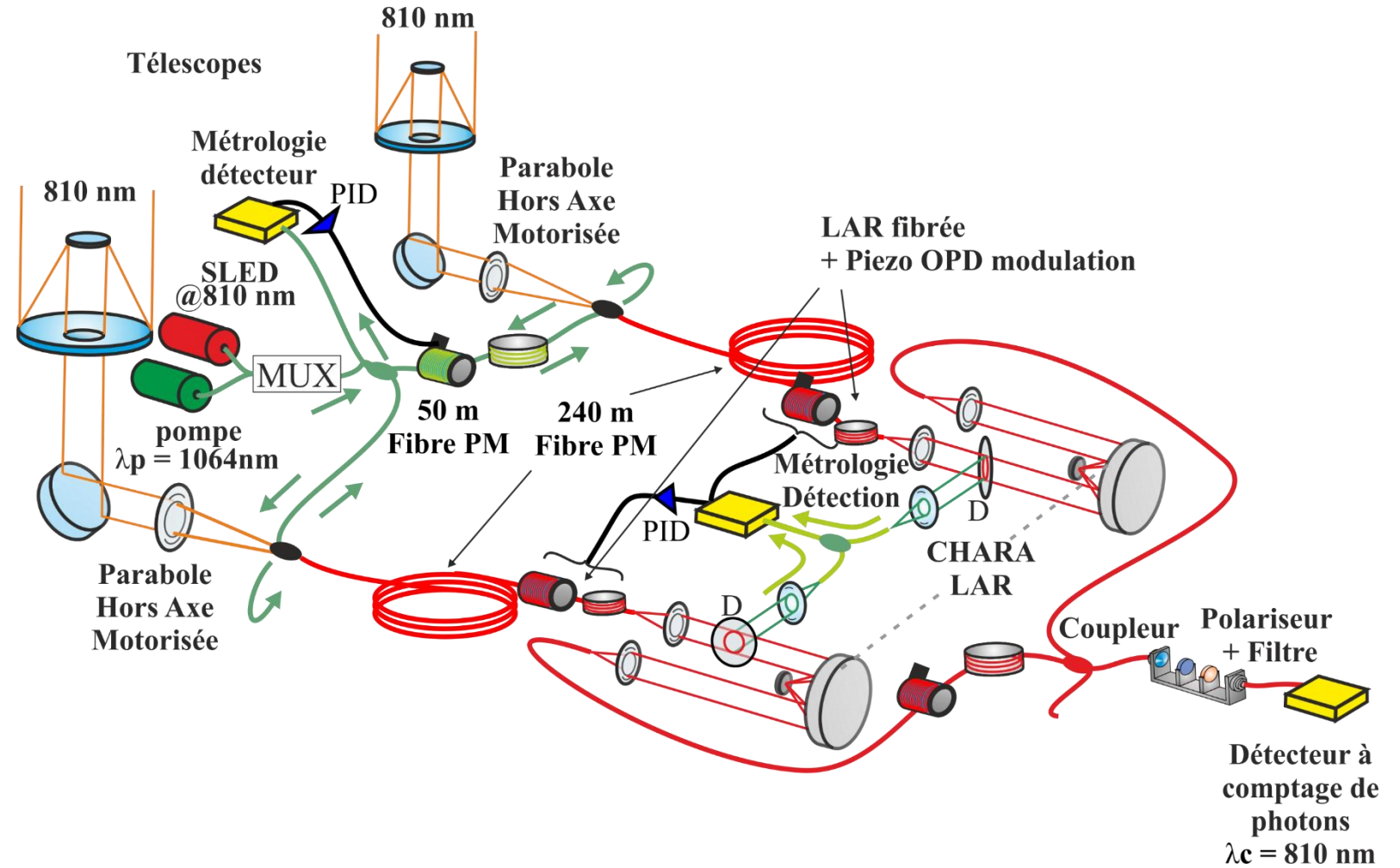
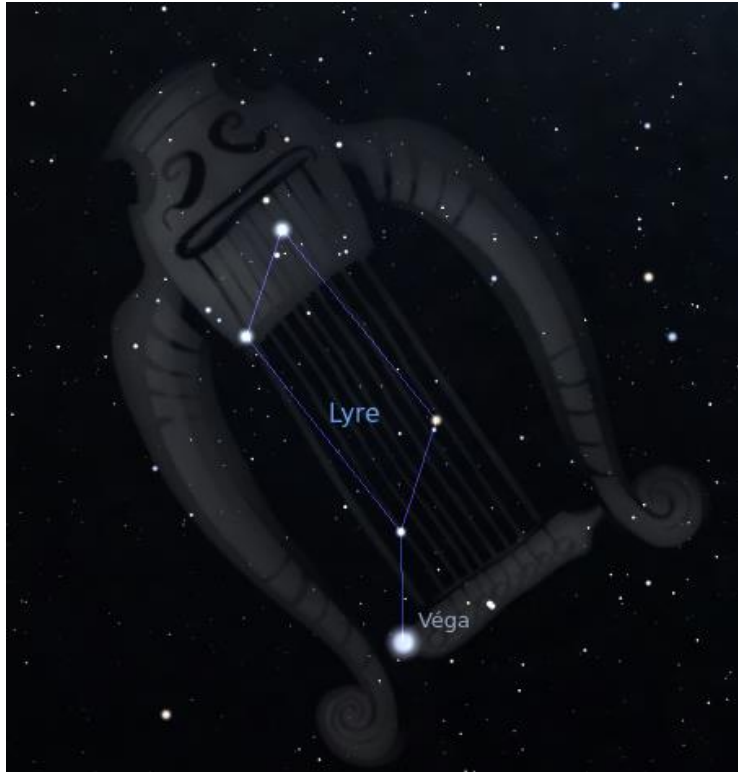
810 nm coupleur fibré
Vers l'étage de détection

TF des franges temporelles

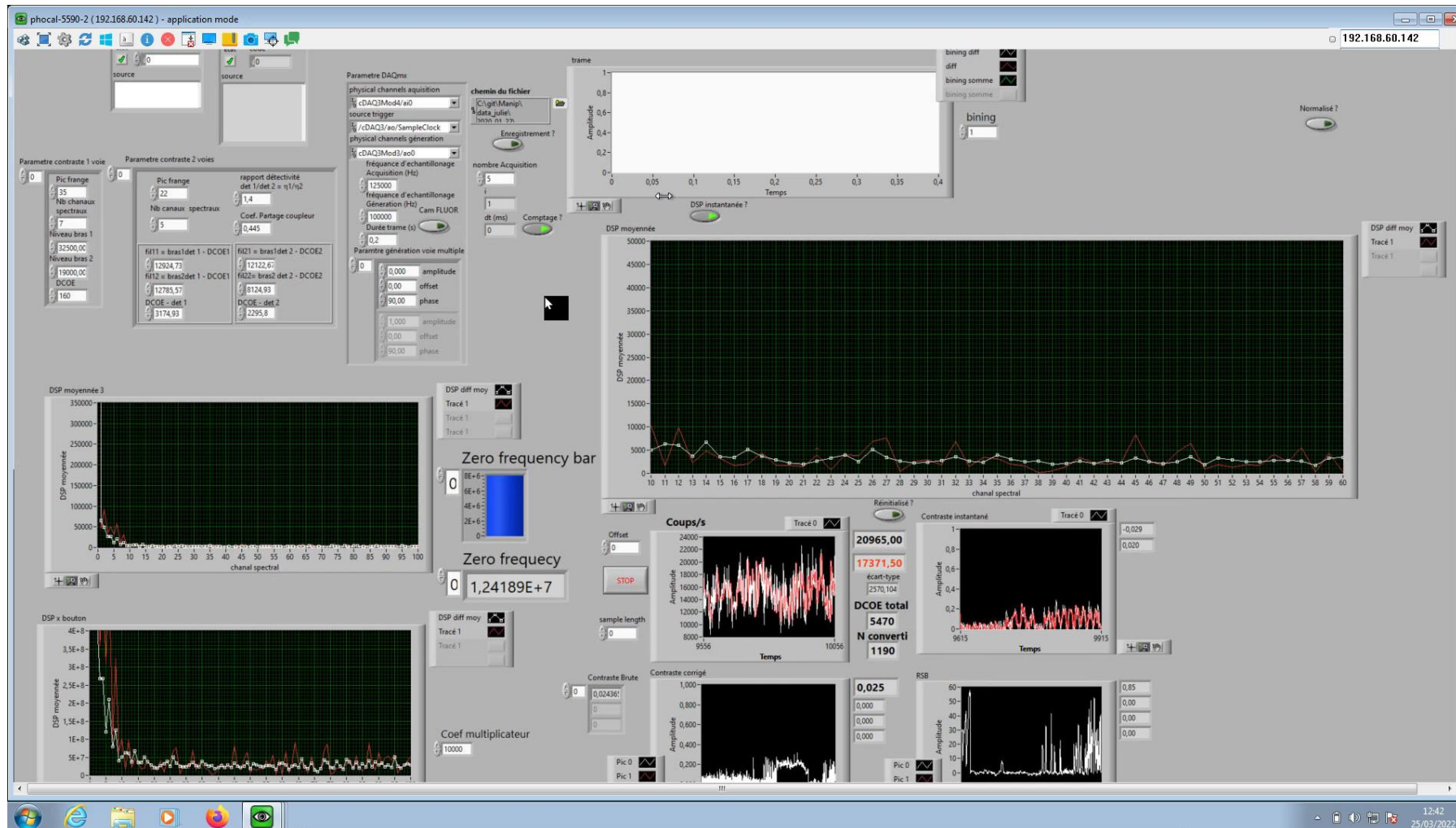
Franges sur le ciel - VEGA - 1000 trames de 0,2 s



Observation de franges sur le ciel à 810 nm
(sans conversion de fréquence)



Franges sur le ciel sans conversion de fréquence (Mars 2022)



!/ franges temporelles

→ modulation de la différence de marche à 141 $\mu\text{m/s}$

Scan à une fréquence de 175 Hz (canal 35)

→ Aller-retour du chariot autour des franges

→ vitesse du chariot à 70,70 $\mu\text{m/s}$

!/ Asservissement des longueurs des fibres de pompe et de transport du signal

Bilan et perspectives

Étude de faisabilité : franges sur le ciel avec un interféromètre à conversion de fréquences à 1,5 μm à CHARA	Validé en 2015 ✓
Conversion sur un bras sur le ciel à 3,5 μm à C2PU (Calern)	Validé en 2019 ✓
Franges en laboratoire avec un interféromètre à conversion de fréquences à 3,5 μm	Validé en 2020 ✓
Franges sur le ciel avec un interféromètre fibré et asservi sans conversion de fréquences à CHARA	Validé en 2022 ✓
Tests de la stabilité des modules de conversion avec une source interne	Validé en 2022 ✓
Conversion sur un bras sur le ciel à 3,5 μm à CHARA	En attente ⌚
Franges sur le ciel avec un interféromètre fibré à conversion de fréquences à 3,5 μm	En attente ⌚

Perspectives pour le projet ALOHA

- Augmentation du TRL (travail sur le packaging)
- ALOHA à 10 μm
- Spectrométrie avec conversion de fréquence (thèse actuelle XLIM)
- ALOHA pour des applications dans l'espace (tests des technologies dans des nanosatellites)
- Collaboration XLIM/CHARA sur la mise en œuvre d'un réseau de télescope fibré kilométrique (12 télescopes dont 1 mobile, base maximale 1130 m, 66 bases)



- : réseau existant (base maxi = 334 m)
- : futur réseau (base maxi = 1130 m)

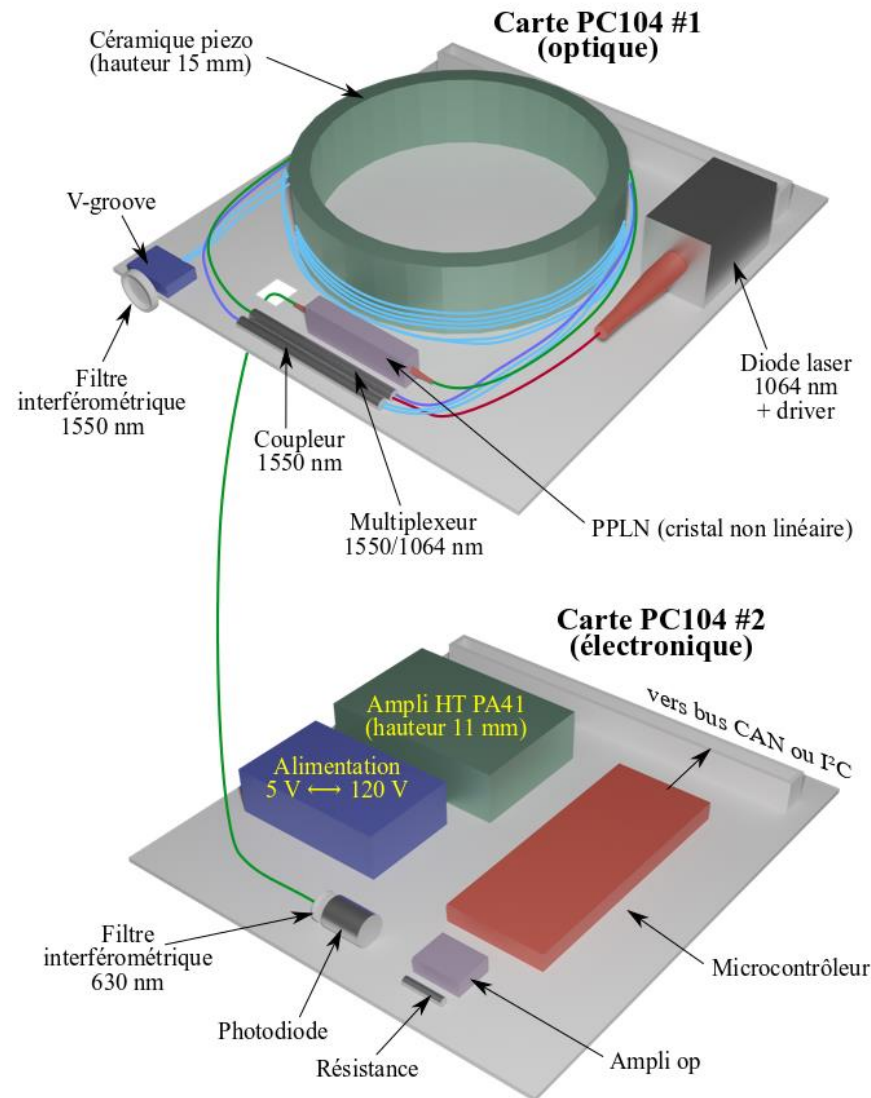
ALOHA dans un CubeSat



Objectif : élargissement du domaine d'application du projet ALOHA au domaine du spatial

→ tests des composants dans un environnement spatial

Mesure du diamètre du Soleil



Sans conversion de fréquences (ESUS)



Avec conversion de fréquences

Revue internationale à comité de lecture :

- ❖ **« Influence of the input-stage architecture on the in-laboratory test of a mid-infrared interferometer: application to the ALOHA up-conversion interferometer in the L band »**,

Julie Magri , Lucien Lehmann, Ludovic Grossard, Laurent Delage, François Reynaud, Mathieu Chauvet, Florent Bassignot, Rodolphe Krawczyk and Jean-Michel Le Duigou ; MNRAS, Vol 501, Feb 2021, pp 531–540, doi.org/10.1093/mnras/staa3283 (Facteur d'impact : 5.356)

- ❖ Université de Limoges : **« Projet ALOHA : Interféromètre fibré à conversion de fréquence dans le moyen et lointain infrarouge »**,

Julie Magri, Ludovic Grossard, Laurent Delage, François Reynaud,
<https://www.unilim.fr/journees-interdisciplinarite/83>– DOI : 10.25965/lji.83 ; CC BY-NC-ND 4.0 International

Soumis et en attente de retour :

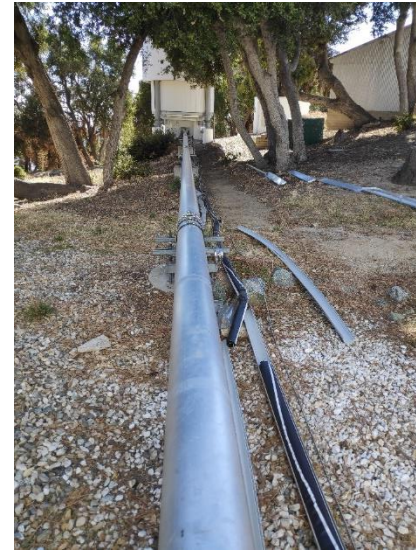
- ❖ **« Outdoor fibre link between two telescopes and the lab of the CHARA array at 810 nm. Demonstration of the optical path servo control. »**,

Julie Magri, Ludovic Grossard, François Reynaud, Marc Fabert, Laurent Delage, Rodolphe Krawczyk and Jean-Michel Le Duigou,
09 September 2022 – Experimental Astronomy, PREPRINT (Version 1) available at Research Square <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2014442/v1>

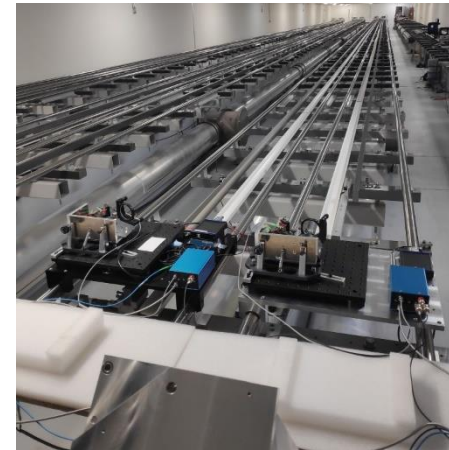
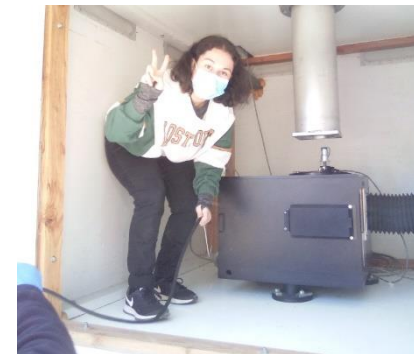
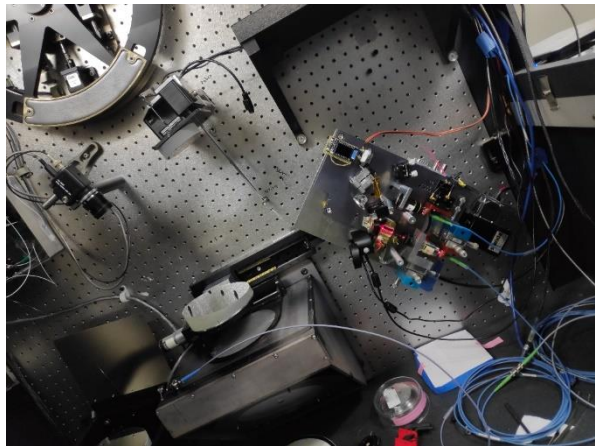
Prêt pour soumission (en attente du retour de la précédente) :

- ❖ **« First on-the-sky interference fringes at 810 nm with the CHARA array using servo controlled hectometric outdoor fibre links »**,

Julie Magri, Ludovic Grossard, François Reynaud, Marc Fabert, Laurent Delage, Robert Ligon, Norm Vargas, Olli Majoinen, Theo ten Brummelaar, Chris Farrington, Nic Scott, Narsireddy Anugu, Gail Schaefer, Douglas Gies, Craig Woods, Steve Golden, Victor Castillo, Matt Anderson, Rodolphe Krawczyk, Jean-Michel Le Duigou,
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2022-2023



Merci de votre attention



ANNEXES



Collaborations:

ESA
 ESO
 CNES
 INSU
 THALES
 EADS
 FEMTO ST
 Observatoires de Nice, Lyon, Meudon,
 Toulouse, Grenoble
 Mauna Kea (HI USA), Mont Wilson (CA USA)



Permanents:

L. Grossard
 F. Reynaud
 L. Delage
 Avec l'aide du secrétariat
 et de l'atelier

Doctorants & post doc:

J. J. Alleman
 H Lagorceix
 E. Longuetau
 S. Pokrovsky
 L. Simohamed
 G. Huss
 J. Sagne
 S. Vergnole
 S. Olivier
 S. Brustlein
 L. Del Rio
 L. Bouyeron
 D. Ceus
 J.T Gomes Novae
 R. Baudoin GB
 P. Darré ESO (D, Chili)
 L. Szemendera GB
 L. Lehmann
 J. Magri



Bande H

Bande L

Influence de λ sur les dimensions du réseau : vers un réseau fibré

Pour une résolution angulaire constante
si $\lambda \nearrow \Rightarrow$ base $\nearrow \Rightarrow \varnothing_{\text{faisceaux}} \nearrow$

	$\lambda = 2,5 \mu\text{m}$	$\lambda = 3,5 \mu\text{m}$	$\lambda = 10 \mu\text{m}$
Rapport d'homothétie R	1	1,4	4
Distance de propagation L (m)	435	609	1740
Longueur de Fresnel α (m)	4908	6871	19632
Diamètre des optiques (cm)	12,5	17,5	50

\Rightarrow refonte complète de l'architecture du réseau

Avantages de l'utilisation de liaisons fibrées :

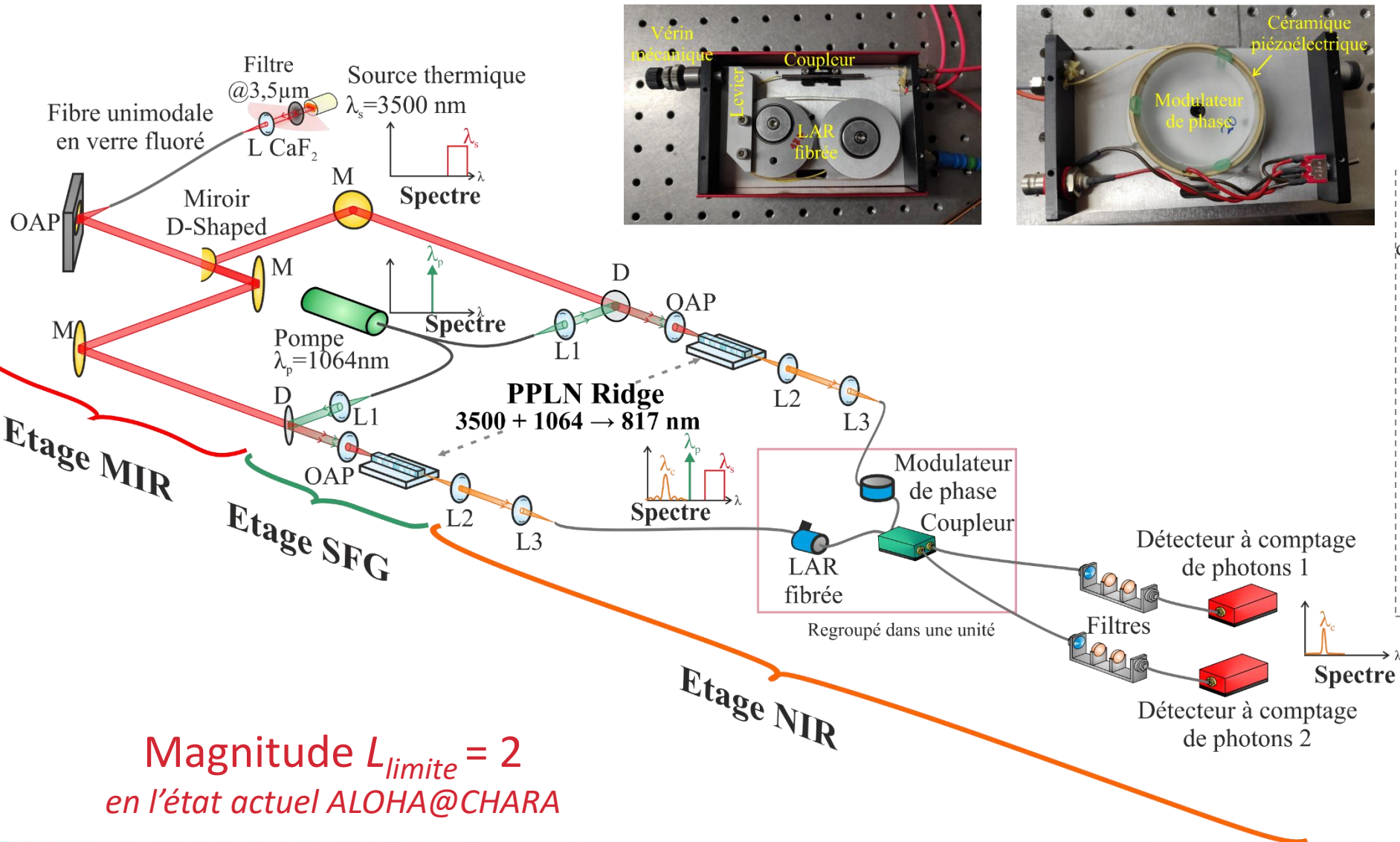
- Plus de limitations liées aux diamètres des faisceaux et à la longueur de Fresnel associée
- Facile d'installation (flexible)
- Peu de pertes de puissance
- Pas besoin de construire des infrastructures complexes (CHARA = site historique protégé)

Conduit PVC

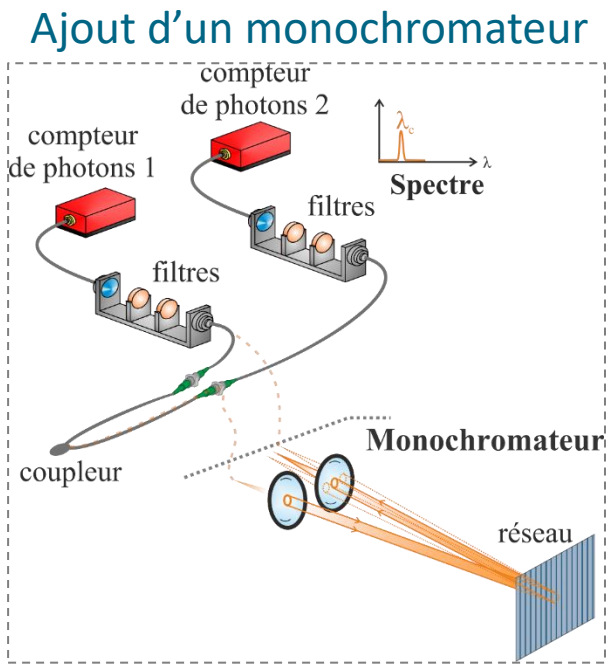
Fibre



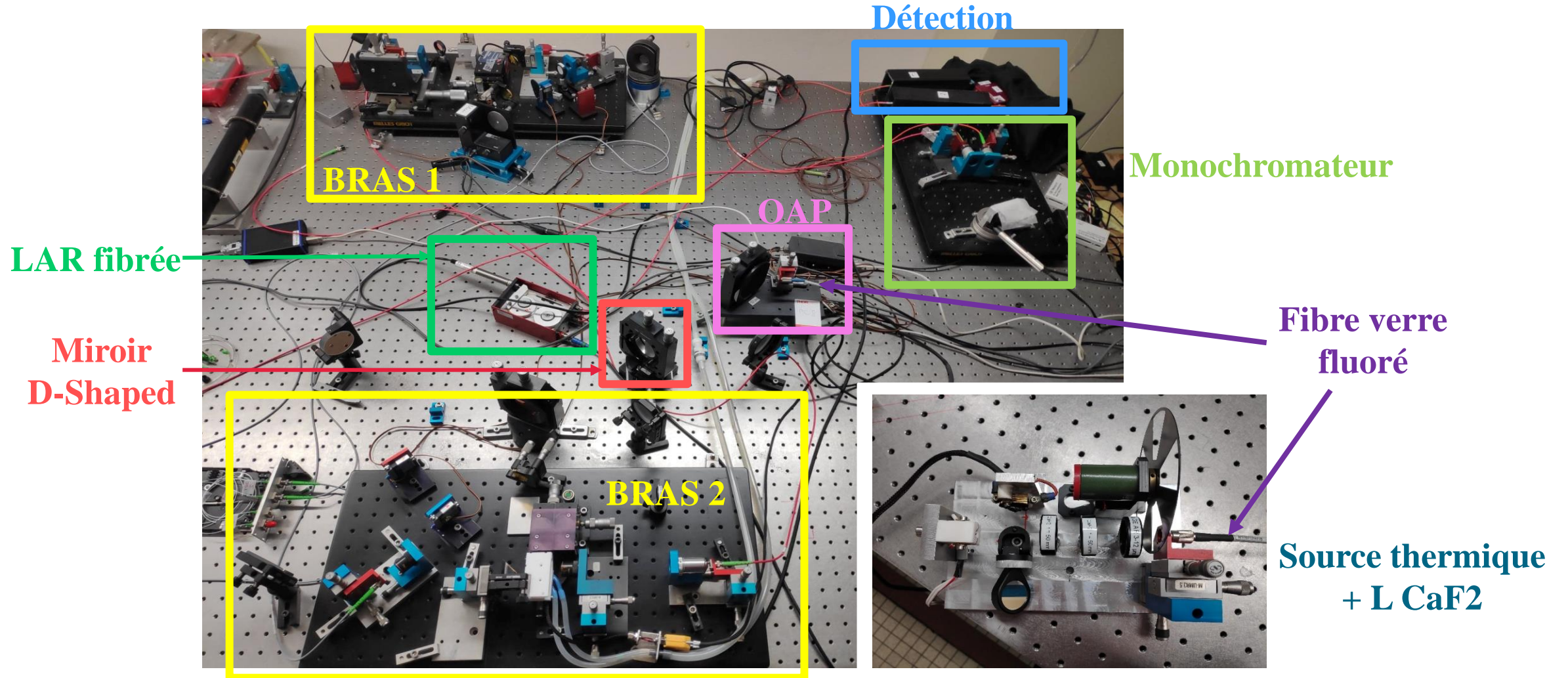
Interféromètre en laboratoire à 3,5 μm



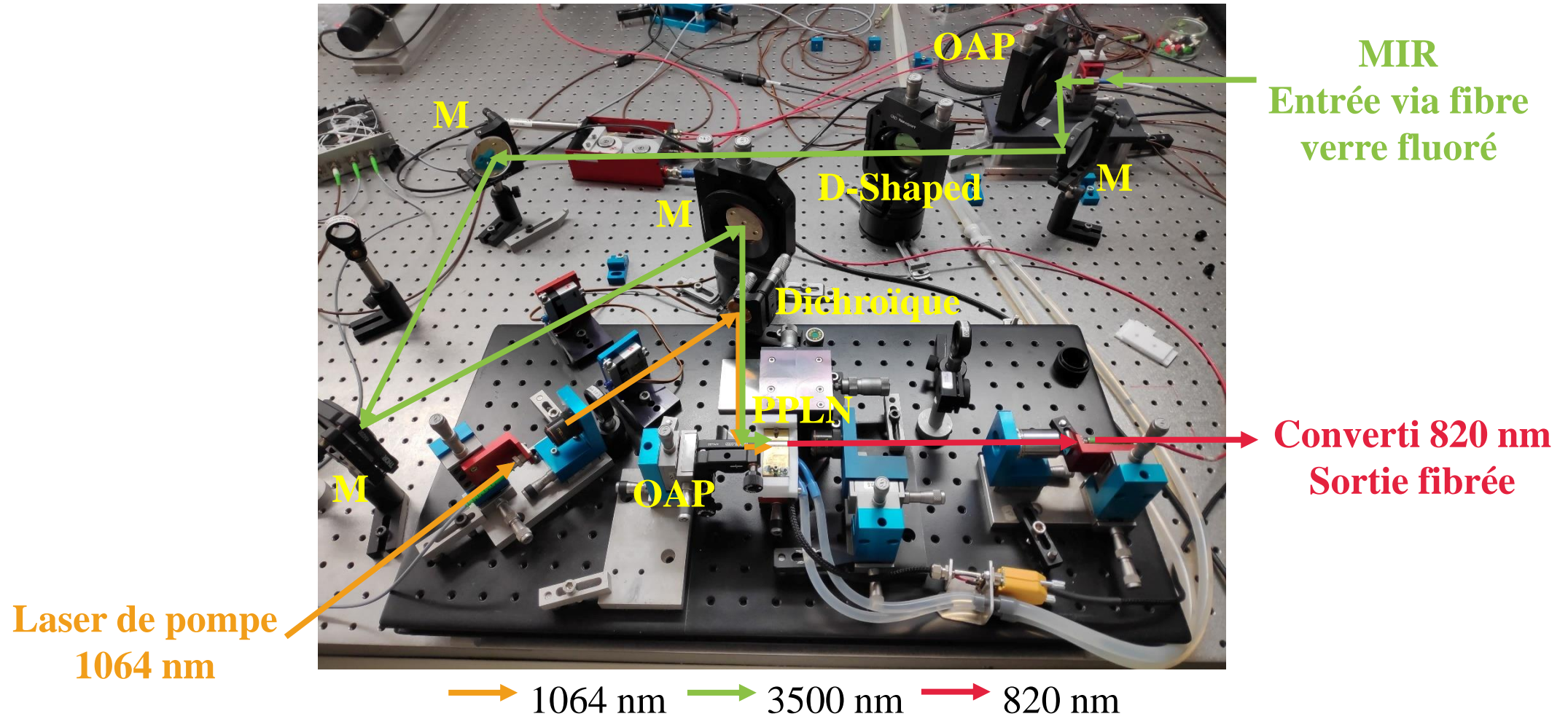
Magnitude $L_{limite} = 2$
 en l'état actuel ALOHA@CHARA



Photographie de l'interféromètre



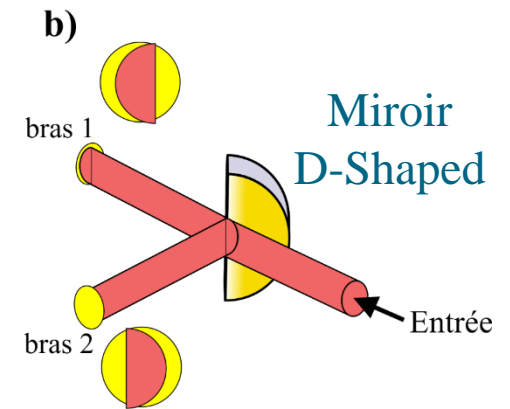
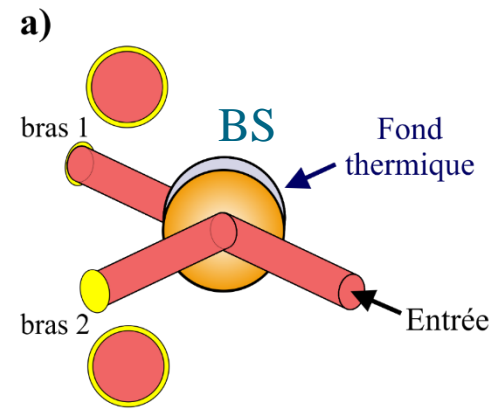
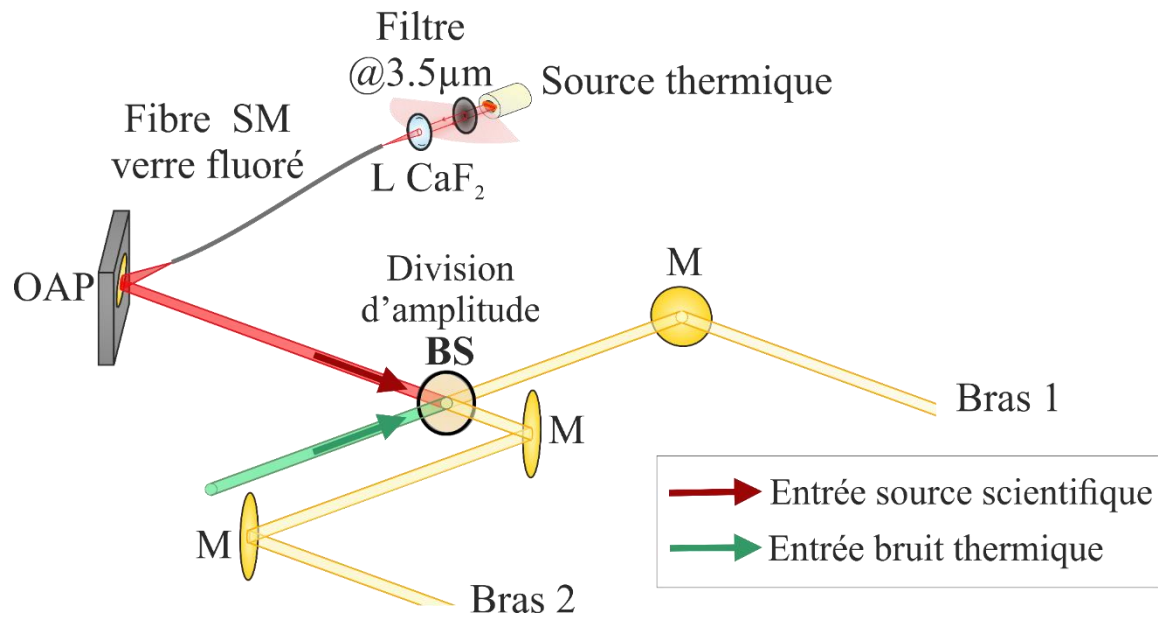
Photographie de l'interféromètre



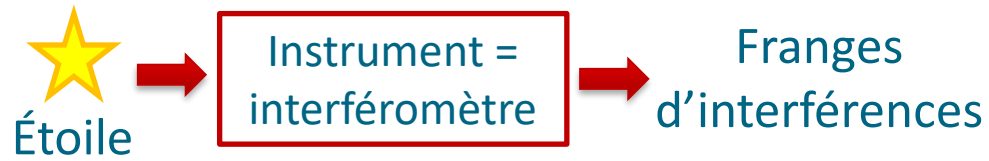
Division d'amplitude VS division front d'onde

Configuration lame séparatrice : division d'amplitude
VS

Configuration miroir D-Shaped : division de front d'onde

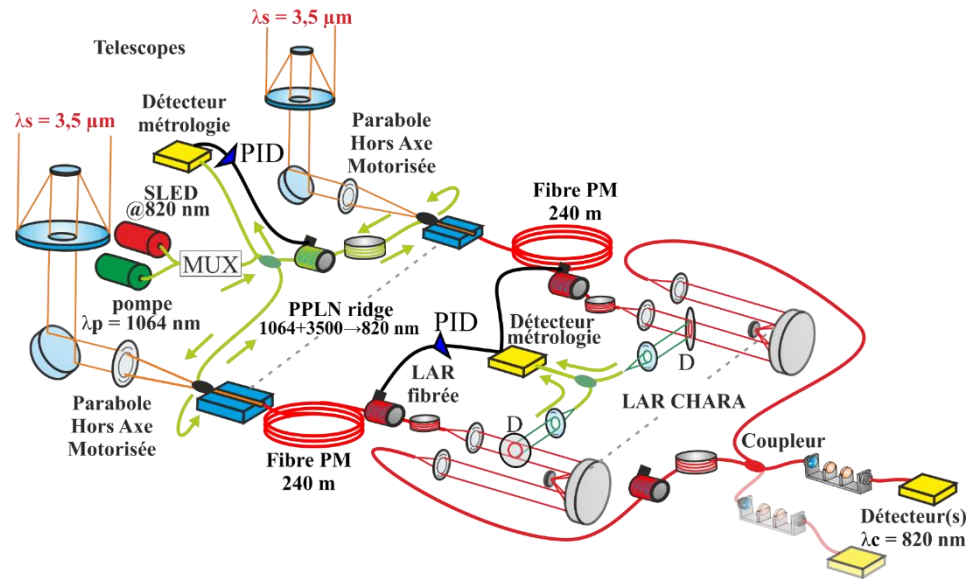
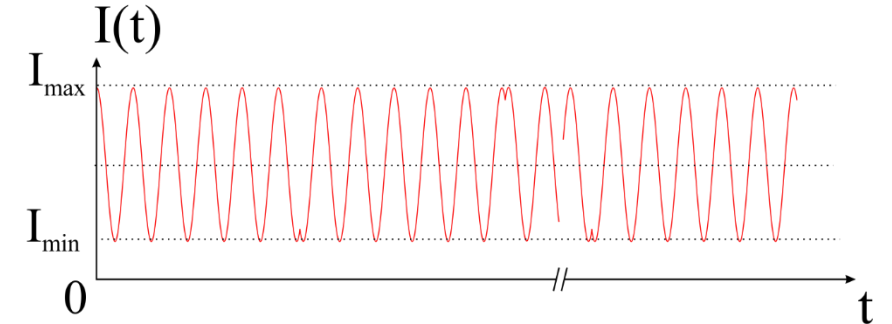


Détection en régime de comptage de photons



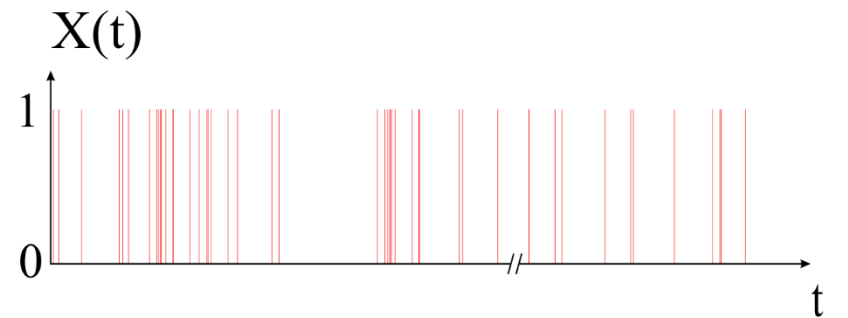
Flux moyen I_0
 x
 Densité de probabilité
 normalisée

Détection analogique continue



Photoévénements
 + bruit

Détection en régime de comptage de photons



Modulation de phase (rampe de tension)

Figure d'interférence temporelle sinusoidale

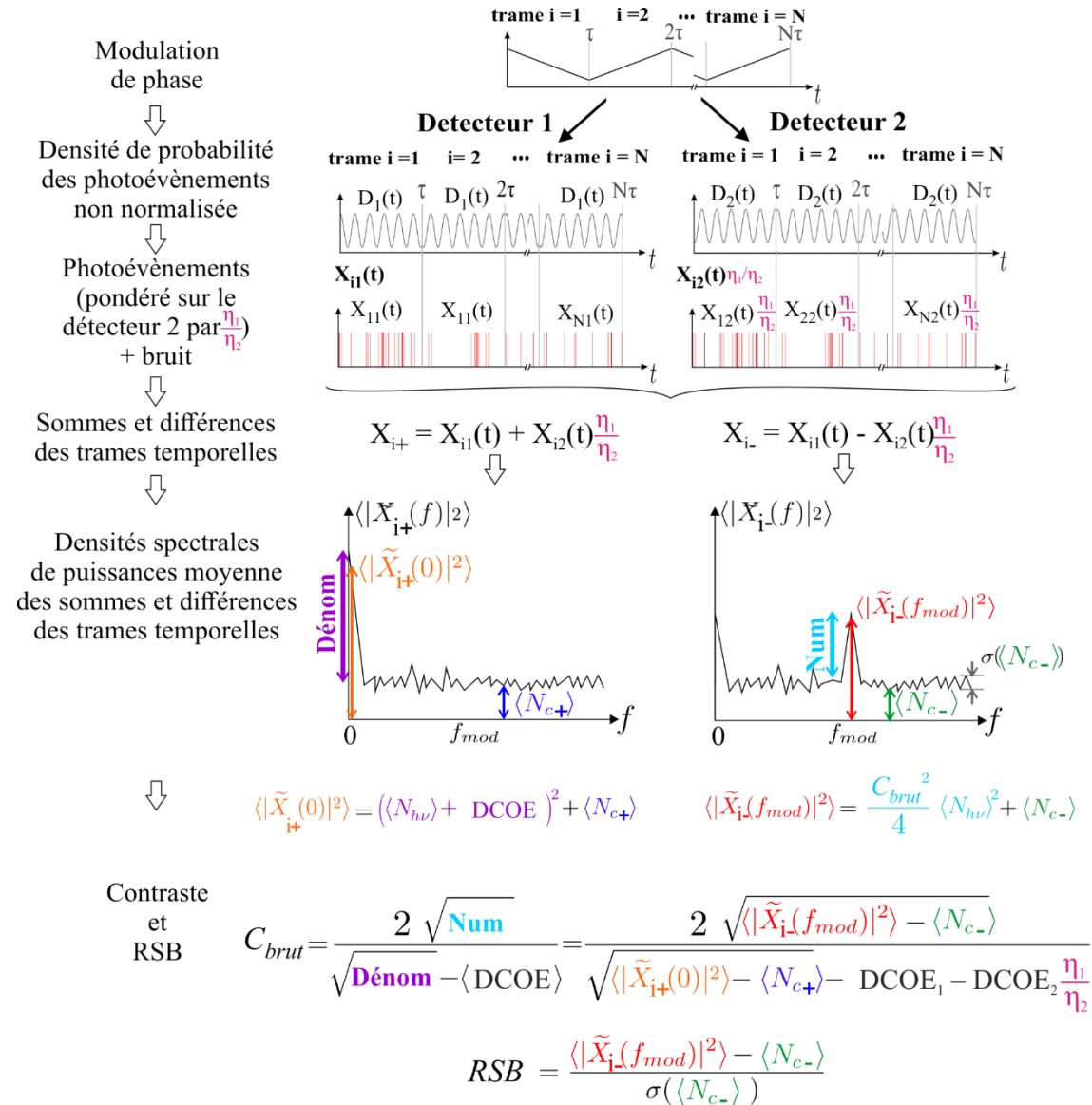
Comptage de photons

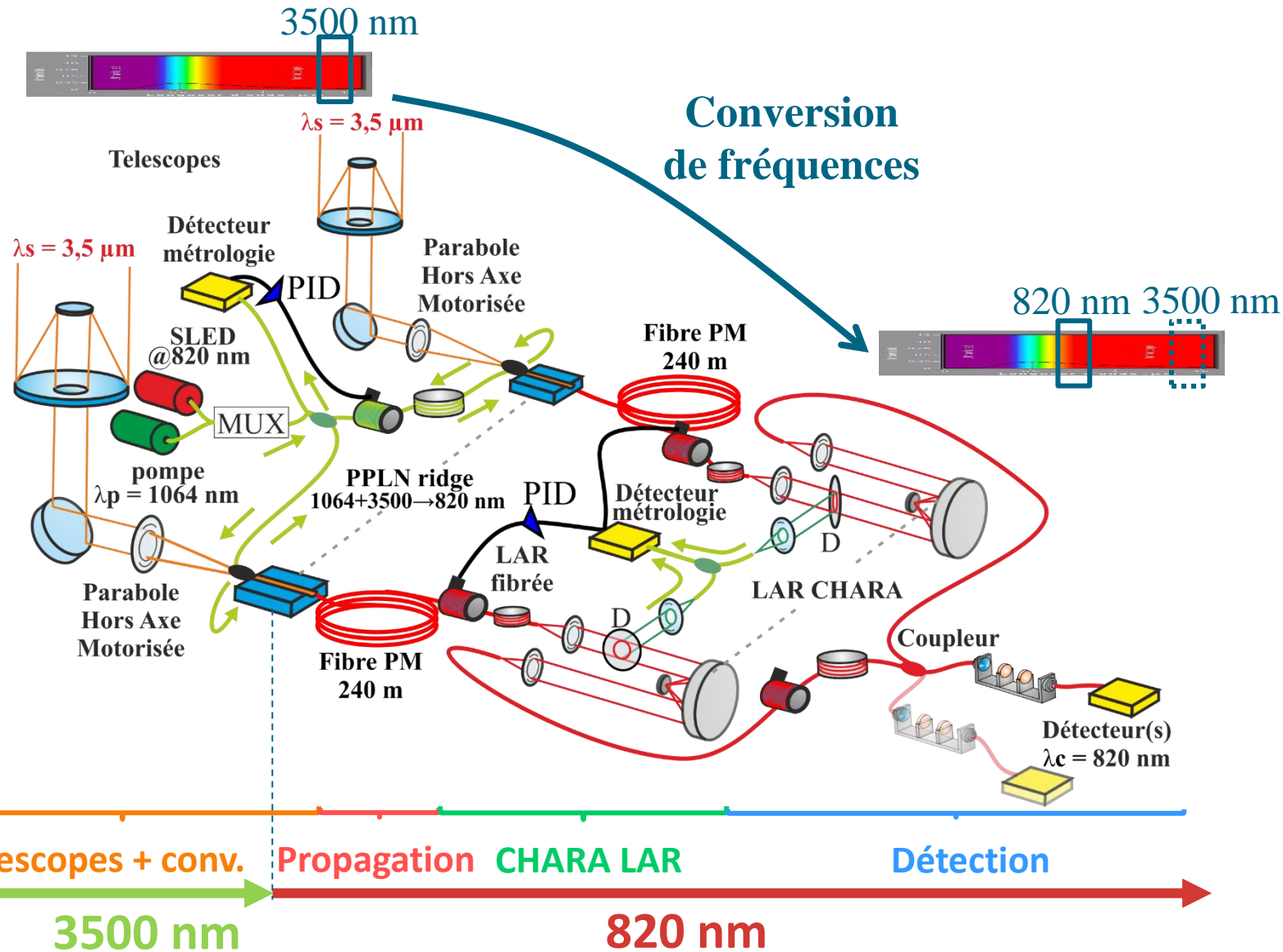
Densité Spectrale de Puissance

Moyennage incohérent

→ Contraste et RSB

(Remarque : deux détecteurs → RSB × 2√2)





Télescopes + conversion de fréquence

- Injection MIR
- Etage de la pompe (fibres 50 m)
- Conversion de $3500 \rightarrow 820\text{ nm}$
- Asservissement Michelson pompe

Propagation fibrée longue distance

- Fibres de 240 m PM 820 nm
- OPD stabilisation

Lignes à retard CHARA

- Lignes à retard CHARA (collimation et réinjection du faisceau converti)
- Asservissement Mach-Zehnder fibres 240 m

Détection

- OPD modulation (piezo)
- Coupleur recombinaison + LAR fibrée
- Filtres + compteur(s) de photons

PPLN: Periodically Poled Lithium Niobate

OPD : Optical Path Difference

- **Deux fibres de 50 m :**

Laser de pompe à 1064 nm dans S1

→ table optique de S1

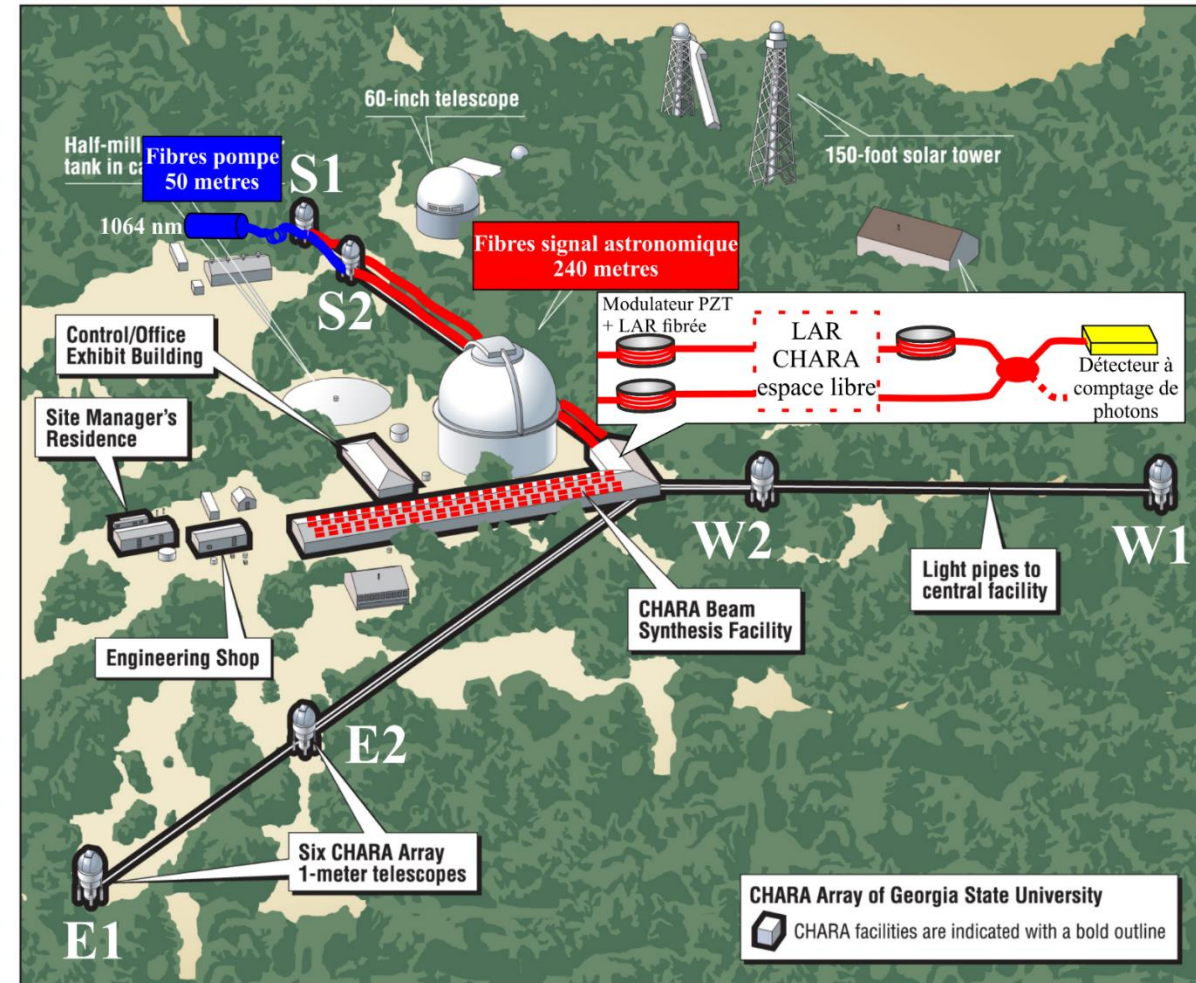
→ table optique de S2

- **Deux fibres de 240 m :**

Signal astronomique à 810-820 nm (converti ou non)

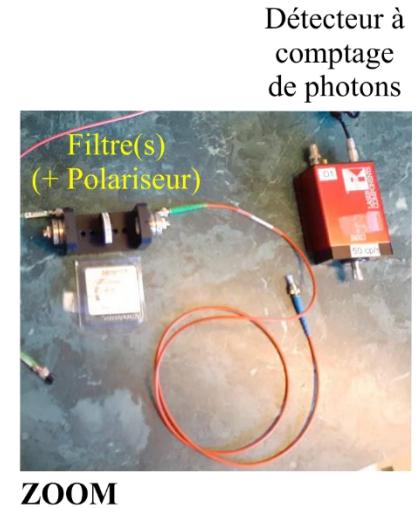
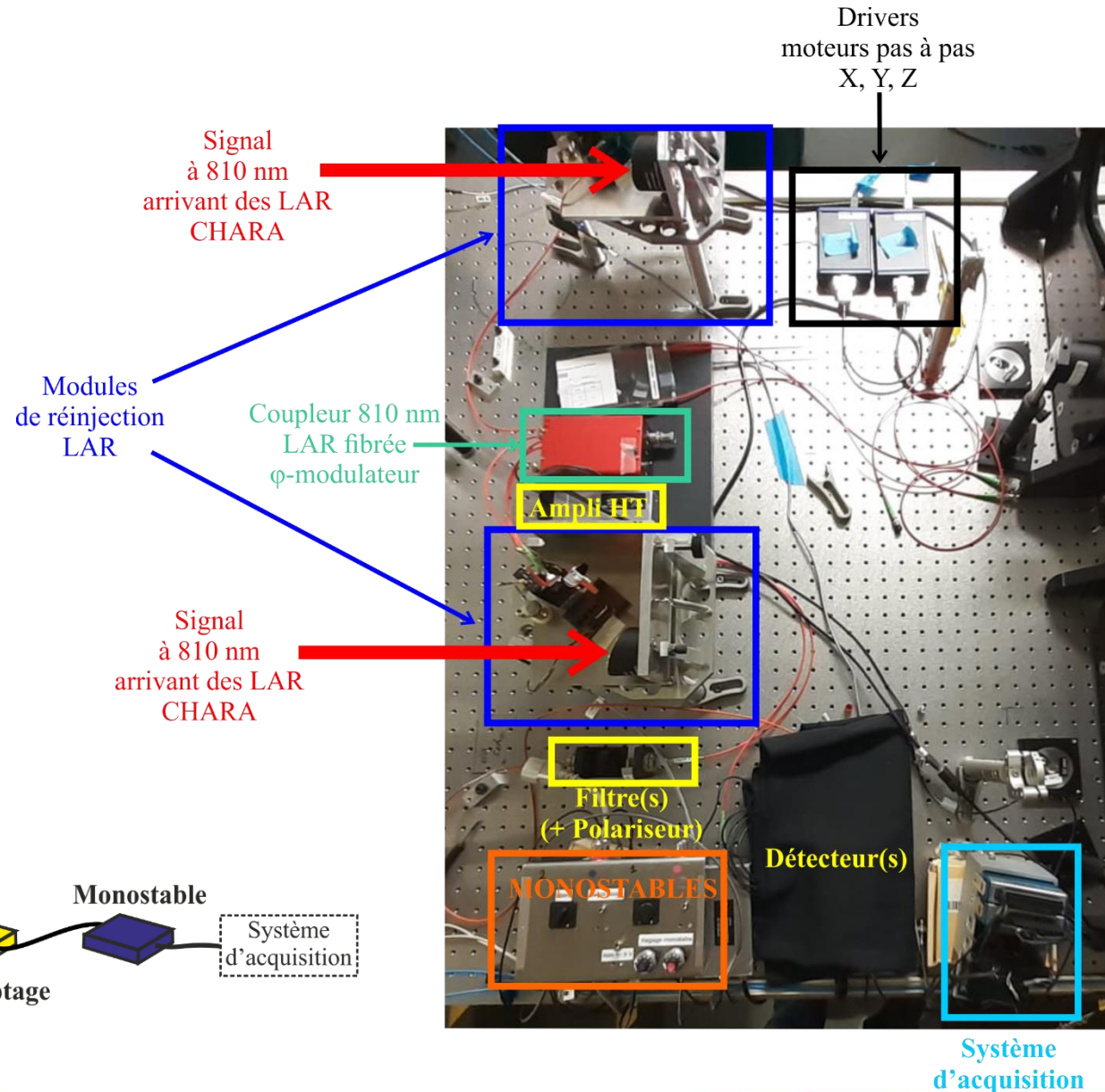
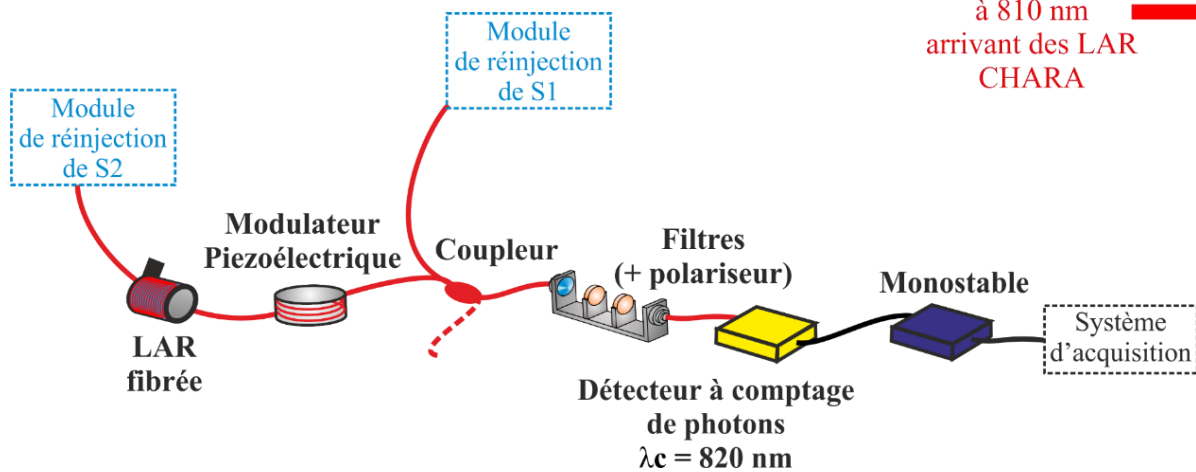
table optique de S1 → lab recombinaison

table optique de S2 → lab recombinaison

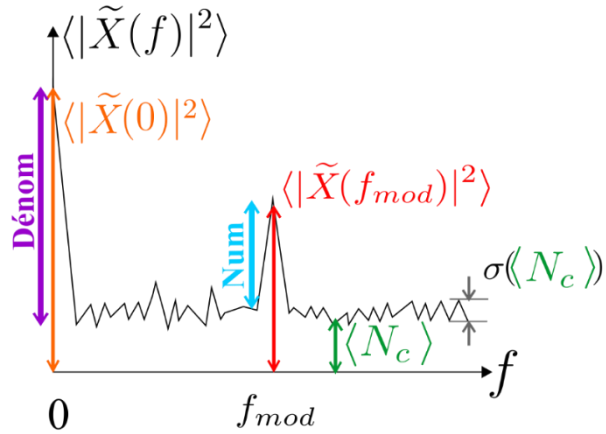


Recombinaison des faisceaux

- Coupleur de recombinaison
- Ligne à retard fibrée (fixe)
- OPD modulation (piezo)
 - franges temporelles
- Filtres
- Compteurs de photons
- Monostables
- Acquisition



Détection sur une voie de sortie du coupleur de recombinaison



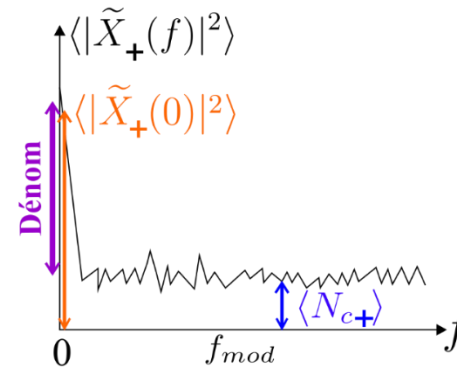
$$\langle |\tilde{X}(0)|^2 \rangle = (\langle N_{hv} \rangle + \text{DCOE})^2 + \langle N_c \rangle \quad \langle |\tilde{X}(f_{mod})|^2 \rangle = \frac{C_{brut}^2}{4} \langle N_{hv} \rangle^2 + \langle N_c \rangle$$

$$C = \frac{2 \sqrt{\text{Num}}}{\sqrt{\text{Dénom}} - \text{DCOE}} = \frac{2 \sqrt{\langle |\tilde{X}(f_{mod})|^2 \rangle - \langle N_c \rangle}}{\sqrt{\langle |\tilde{X}(0)|^2 \rangle - \langle N_c \rangle} - \text{DCOE}}$$

$$RSB = \frac{\langle |\tilde{X}(f_{mod})|^2 \rangle - \langle N_c \rangle}{\sigma(\langle N_c \rangle)}$$

Détection sur les deux voies de sortie du coupleur de recombinaison

Somme des trames temporelles

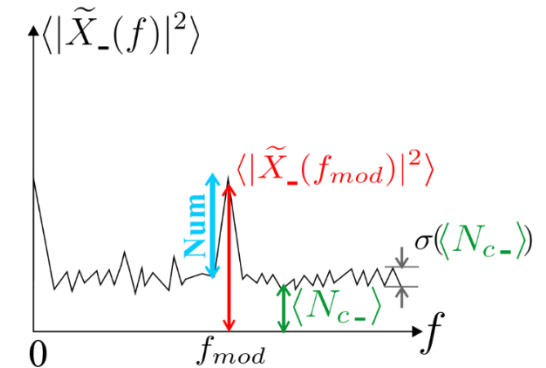


$$\langle |\tilde{X}_+(0)|^2 \rangle = (\langle N_{hv} \rangle + \text{DCOE})^2 + \langle N_{c+} \rangle$$

$$C = \frac{2 \sqrt{\text{Num}}}{\sqrt{\text{Dénom}} - \text{DCOE}} = \frac{2 \sqrt{\langle |\tilde{X}_-(f_{mod})|^2 \rangle - \langle N_{c-} \rangle}}{\sqrt{\langle |\tilde{X}_+(0)|^2 \rangle - \langle N_{c+} \rangle} - \text{DCOE}}$$

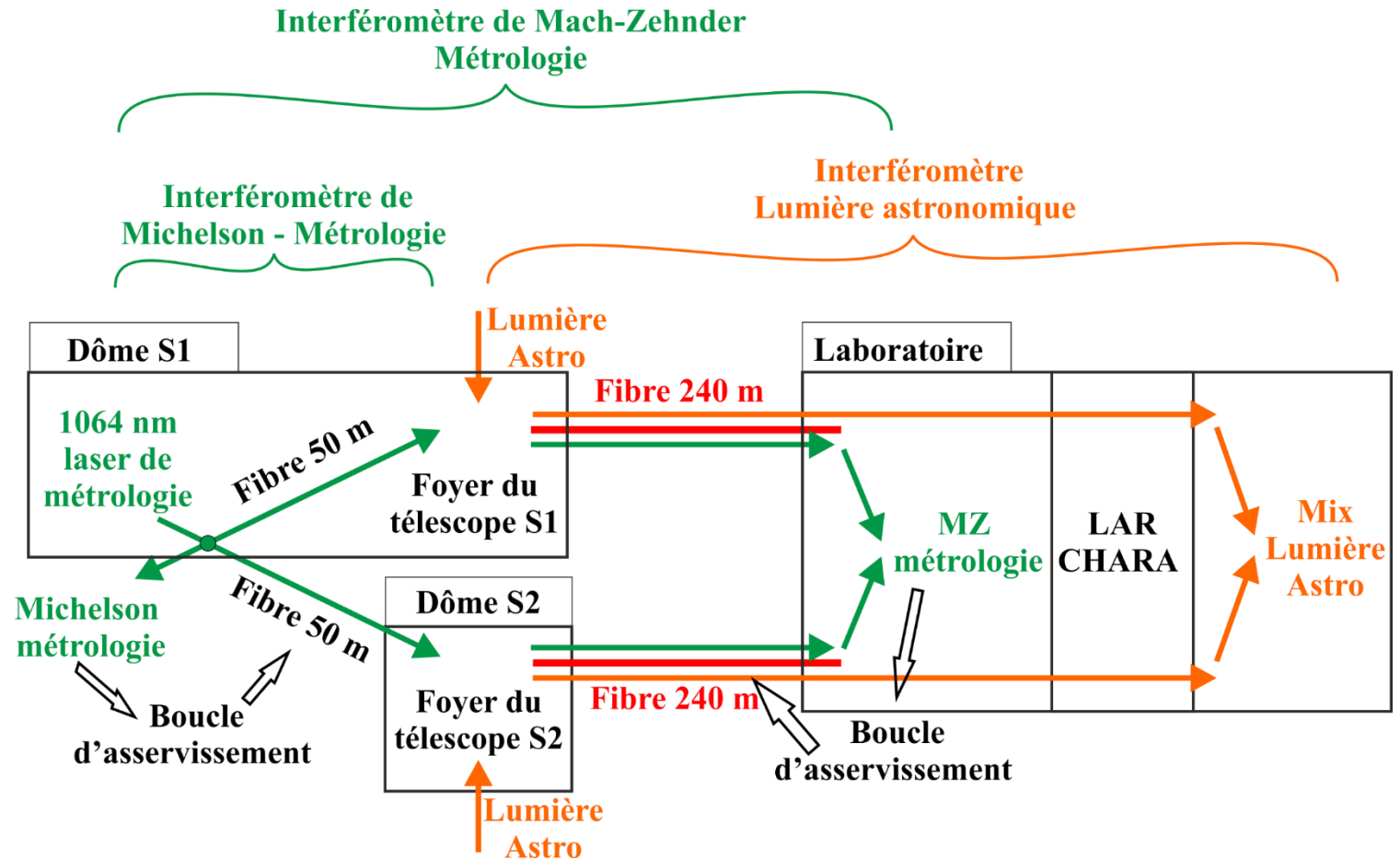
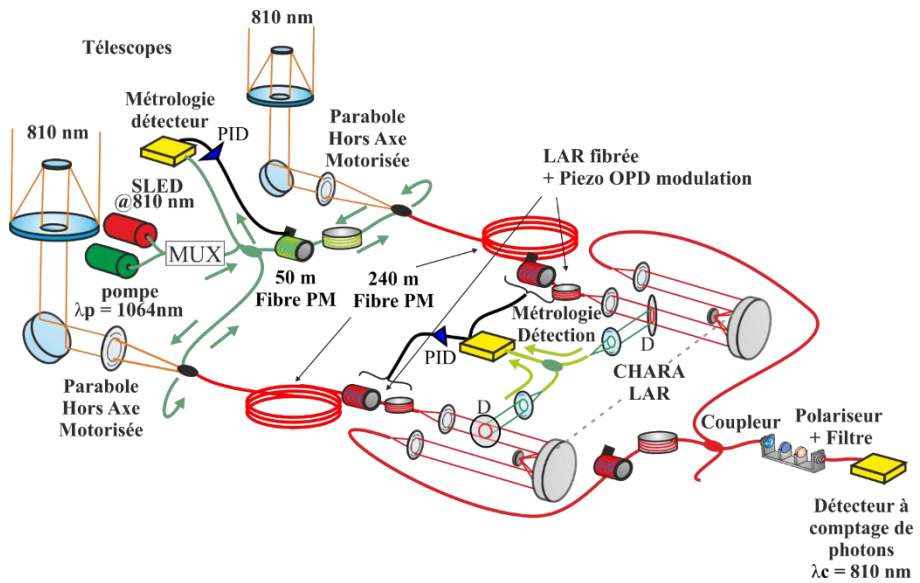
$$RSB = \frac{\langle |\tilde{X}_-(f_{mod})|^2 \rangle - \langle N_{c-} \rangle}{\sigma(\langle N_{c-} \rangle)}$$

Différence des trames temporelles

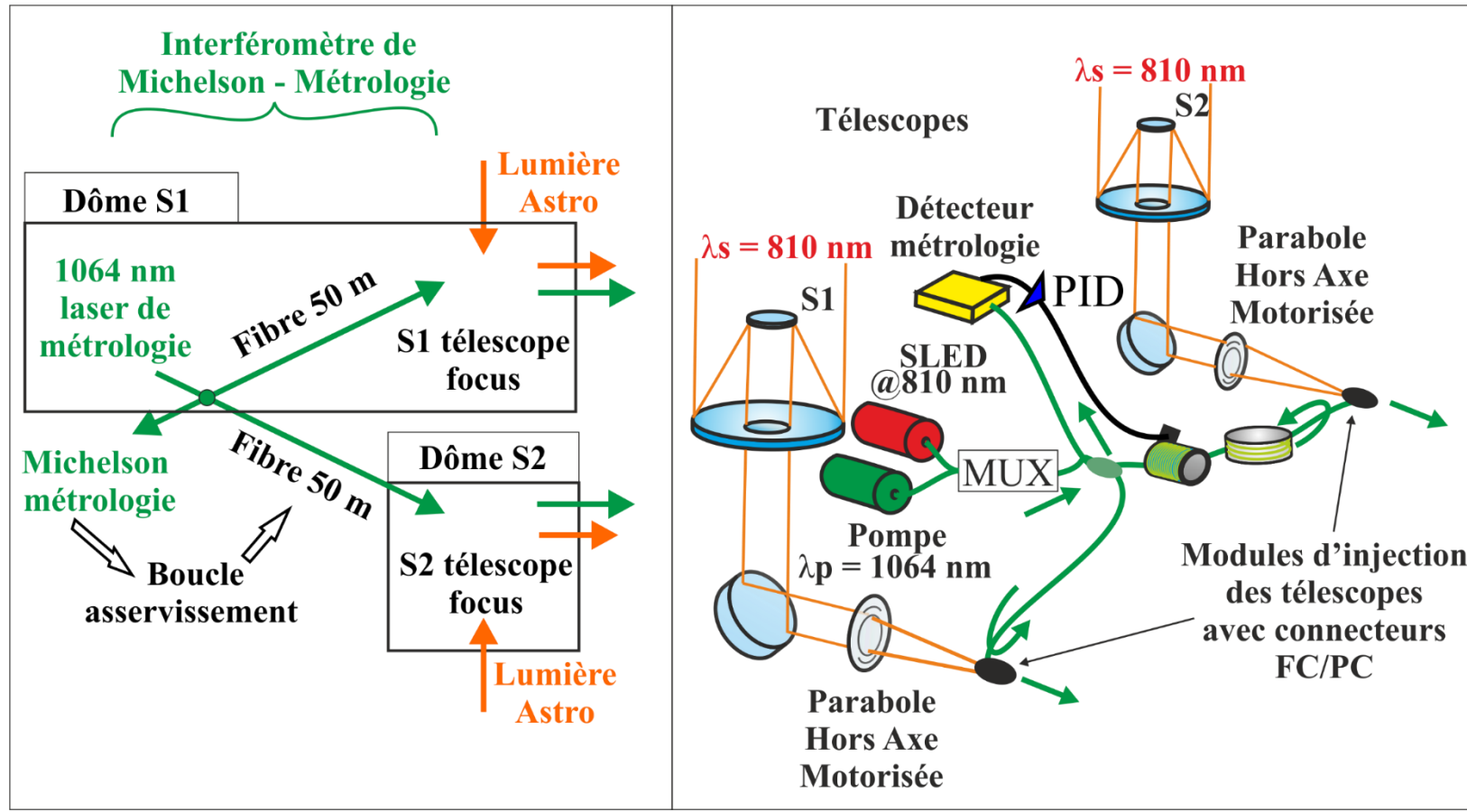


$$\langle |\tilde{X}_-(f_{mod})|^2 \rangle = \frac{C_{brut}^2}{4} \langle N_{hv} \rangle^2 + \langle N_{c-} \rangle$$

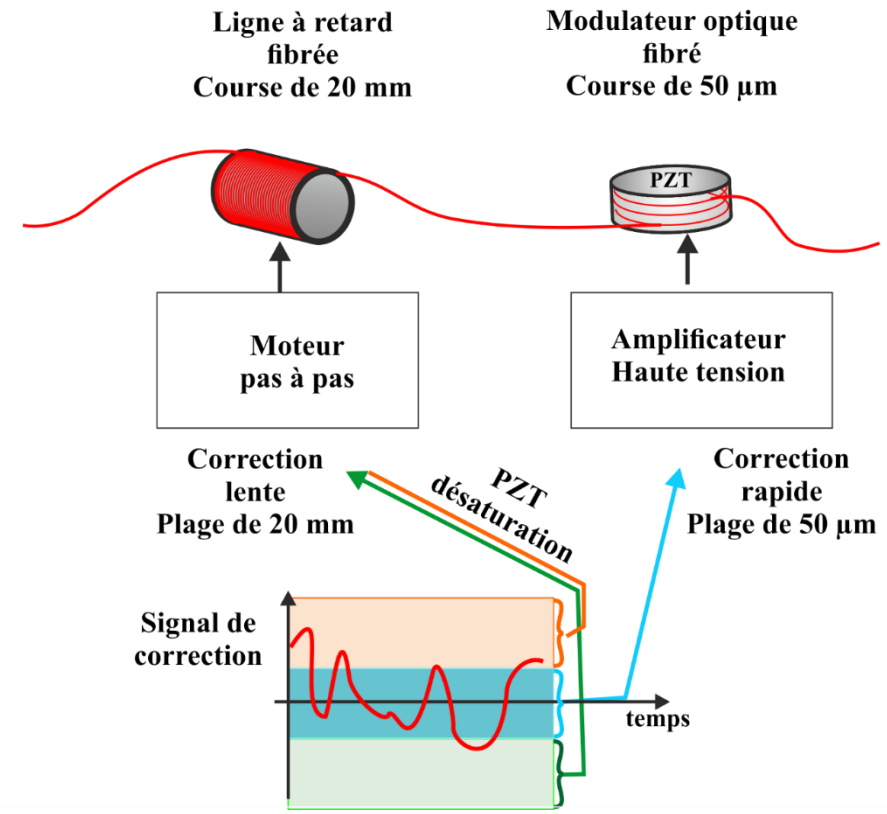
RSB x 2√2



Asservissement des fibres : interféromètre de Michelson

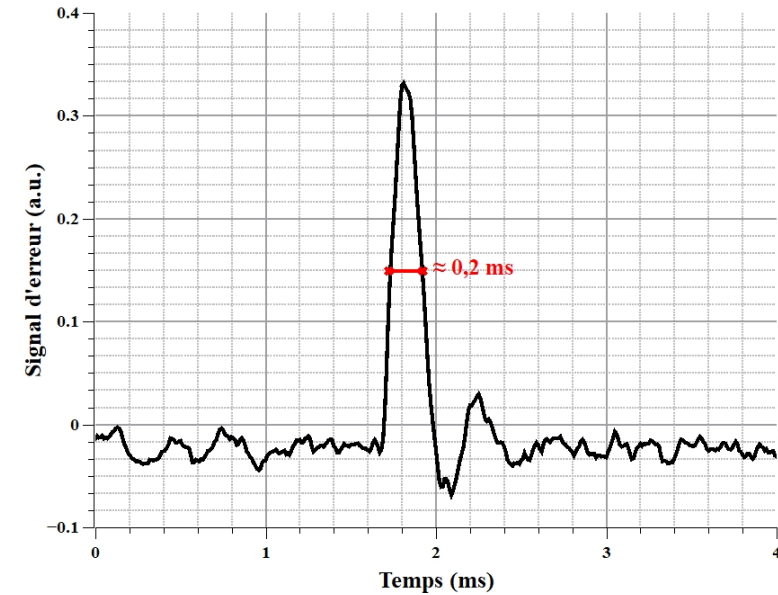


Plage de correction des actuateurs

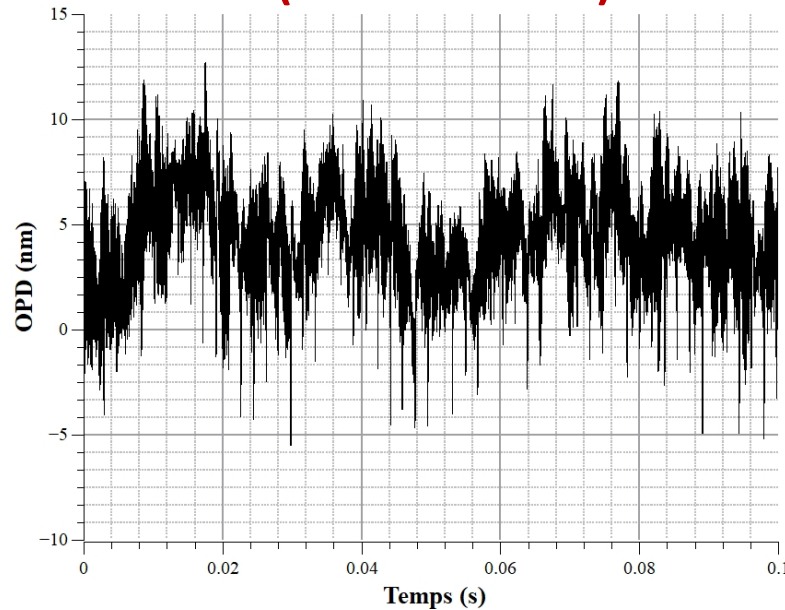


Asservissement des fibres : interféromètre de Michelson

Temps de réponse $\approx 0,2$ ms



**Stabilité à court terme
(trame 100 ms)**

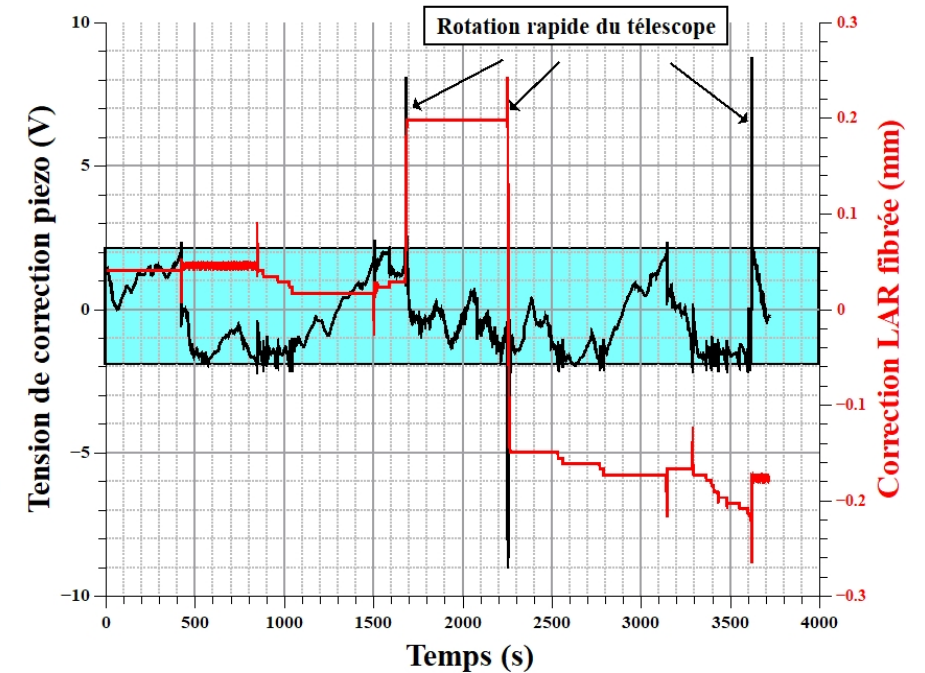


RMS = 3 nm

- Franges observables pour chaque trame
- Différence de marche ≈ 0

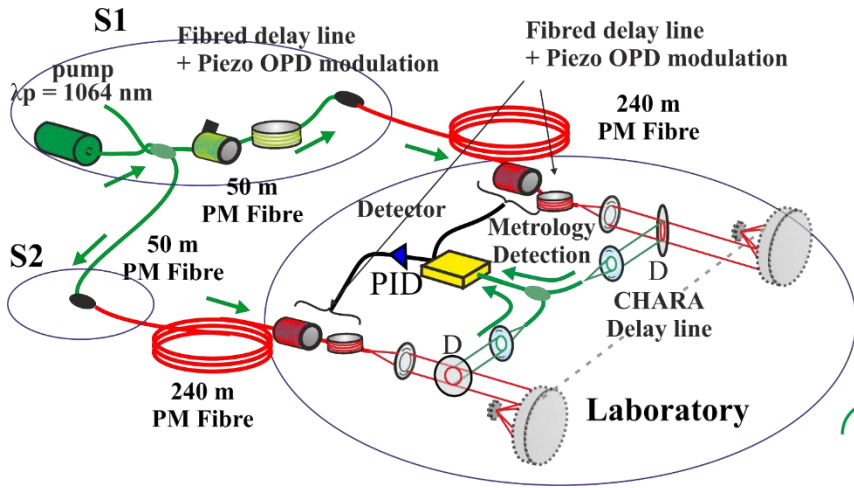
$L_c = 164 \mu\text{m}$

**Stabilité à long terme
(≈ 1 heure)**

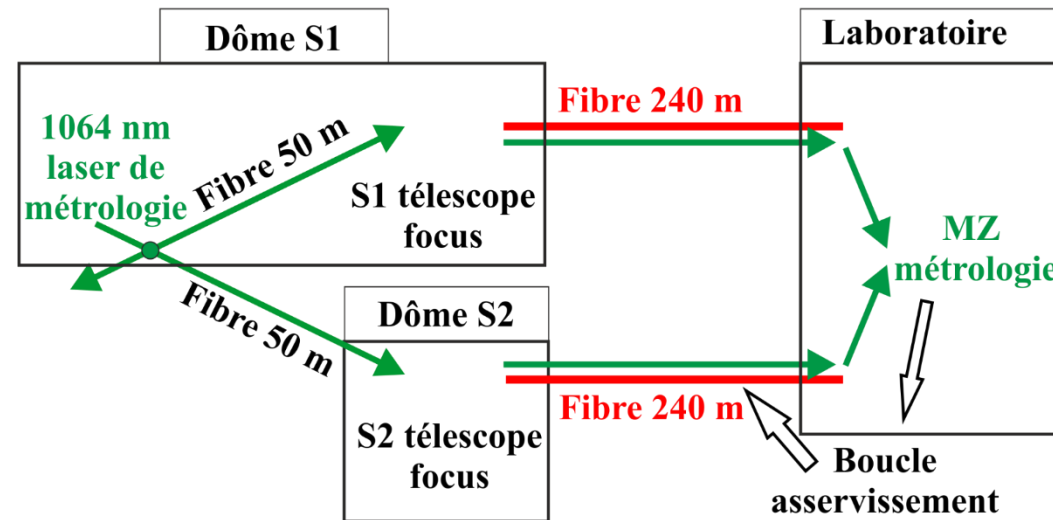


- Différence de marche $<$ longueur de cohérence

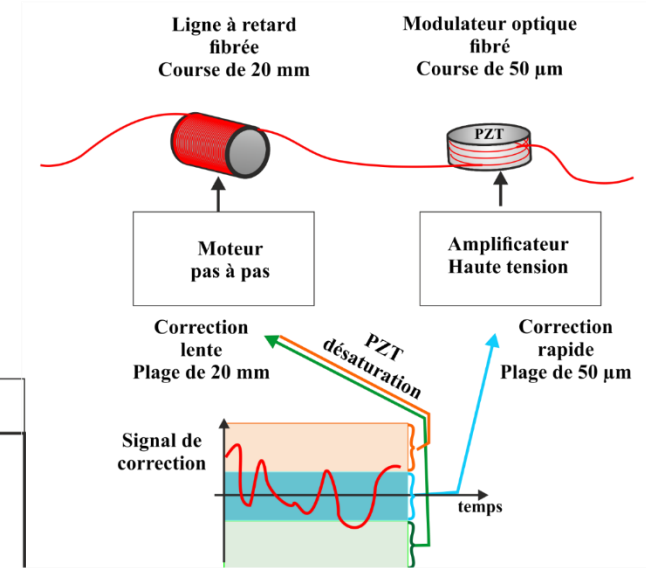
Asservissement des fibres : interféromètre de Mach-Zehnder



Interféromètre de Mach-Zehnder Métrologie



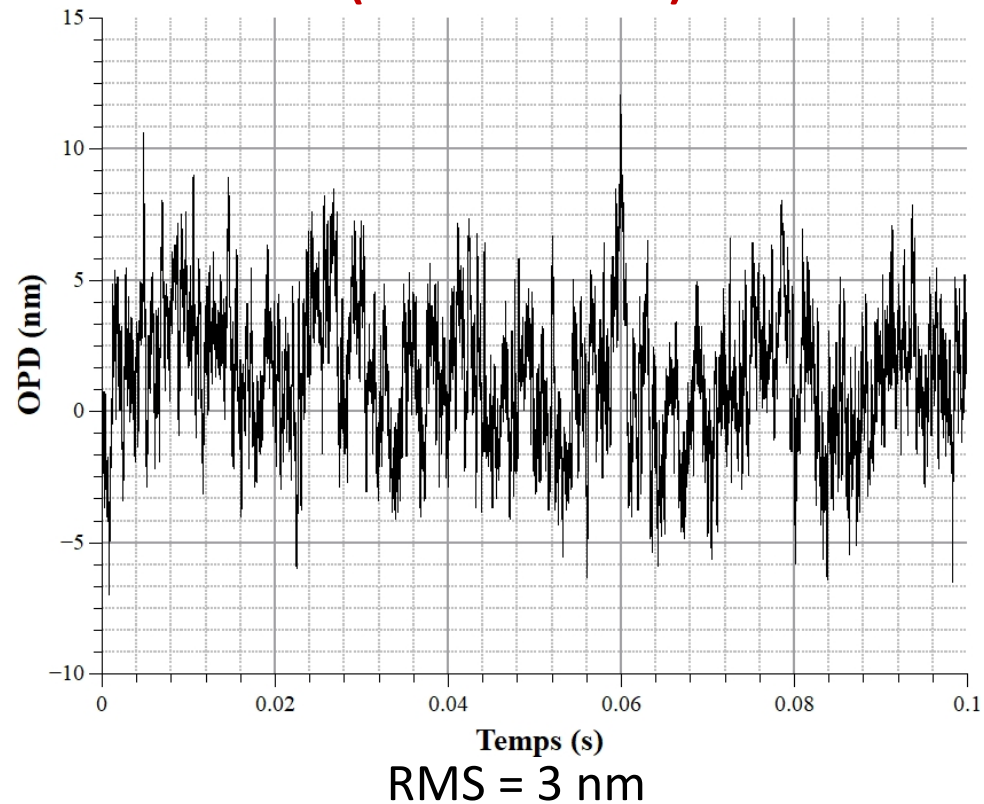
Plage de correction des actuateurs



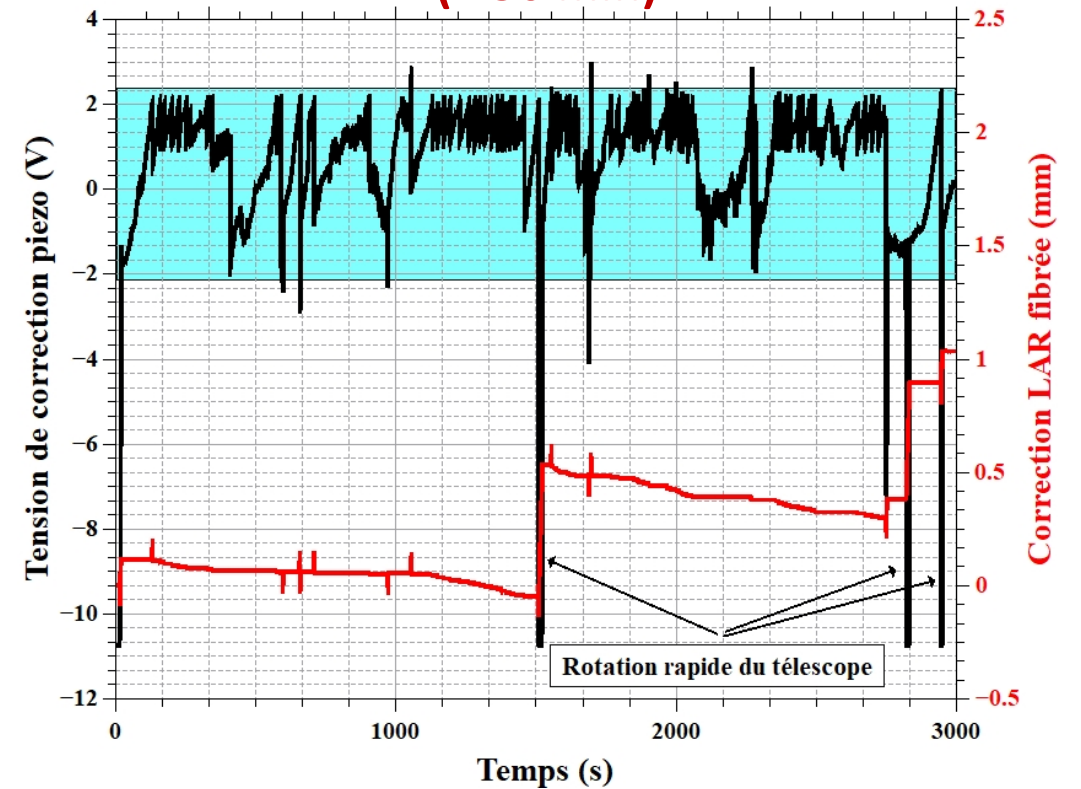
Asservissement des fibres : interféromètre de Mach-Zehnder

Comme pour le Michelson → **Temps de réponse $\approx 0,2$ ms**

**Stabilité à court terme
(trame 100 ms)**

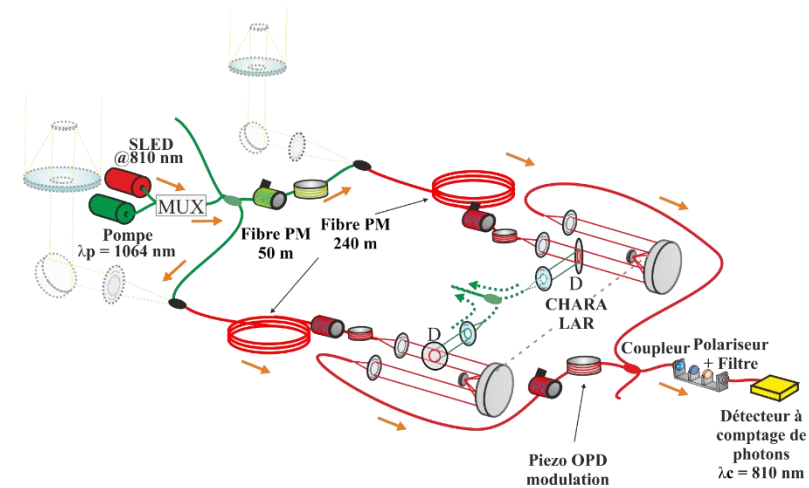


**Stabilité à long terme
(≈ 50 min)**



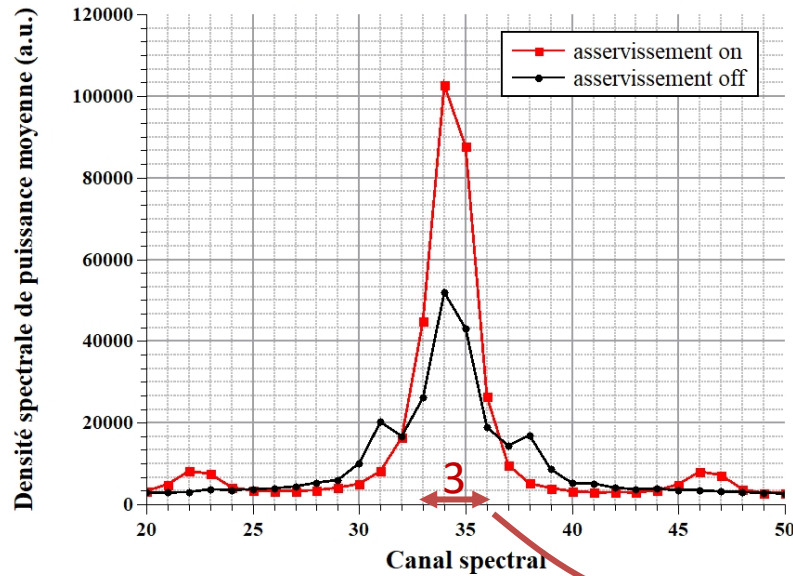
Franges à 810 nm avec une source interne

Asservissement
Sans asservissement



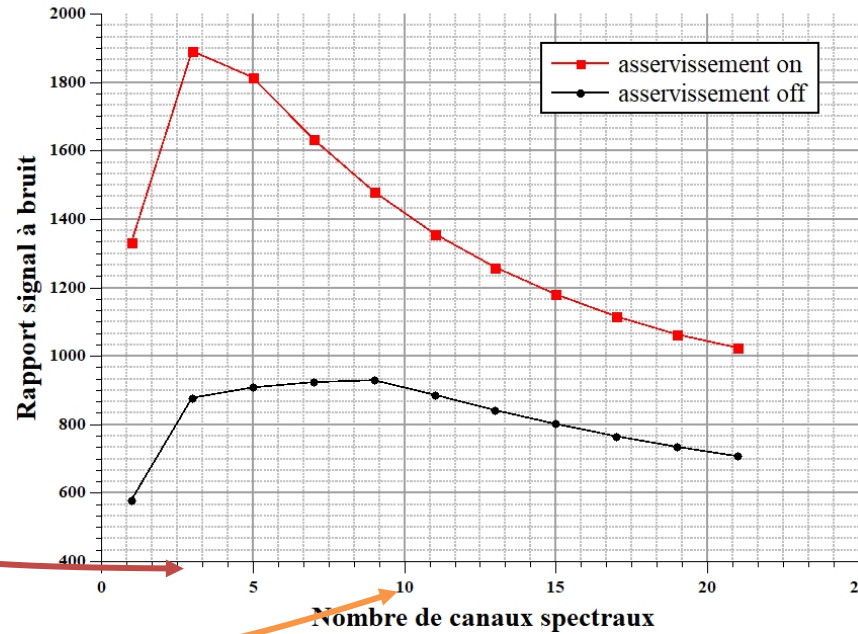
Amélioration du pic franges

Franges en interne - 1000 trames de 0,2s



Amélioration du RSB

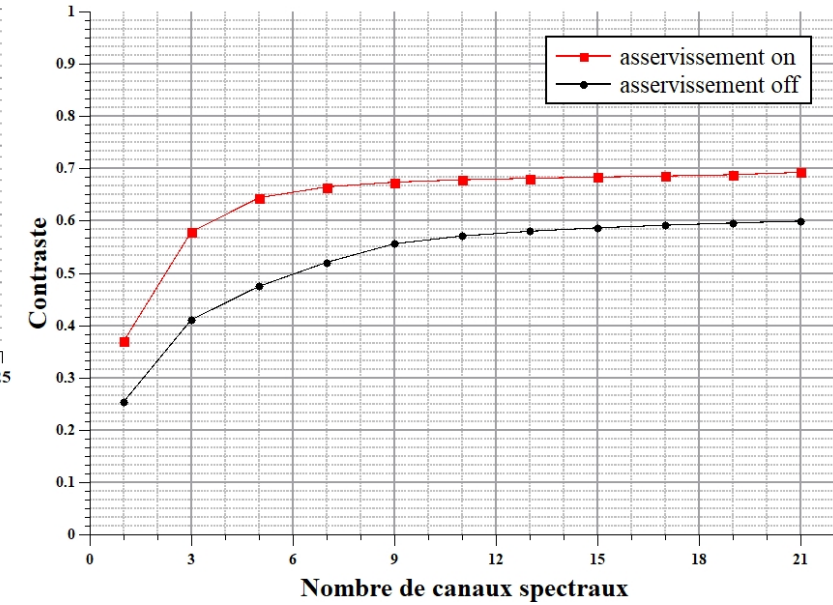
Franges en interne - RSB après 1000 trames de 0,2 s



← 10 →
Nombre de canaux spectraux

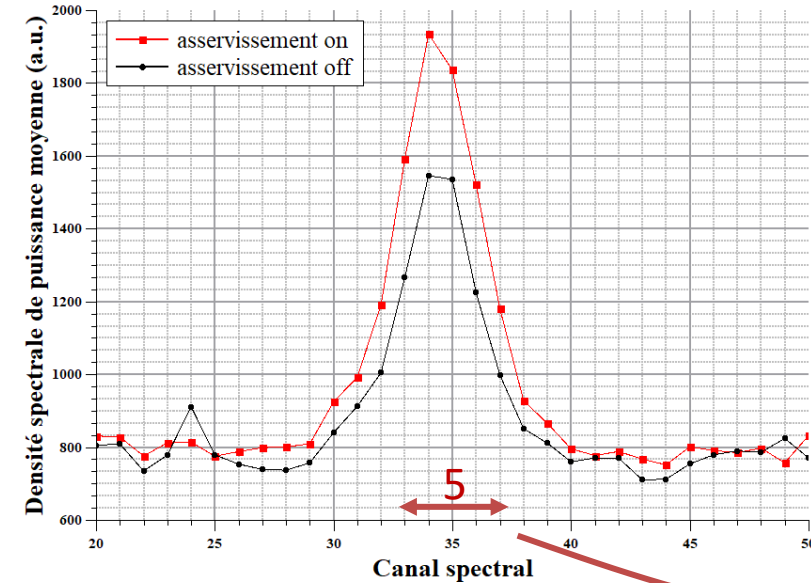
Amélioration du contraste

Franges en interne - Contraste après 1000 trames de 0,2 s



Amélioration du pic franges

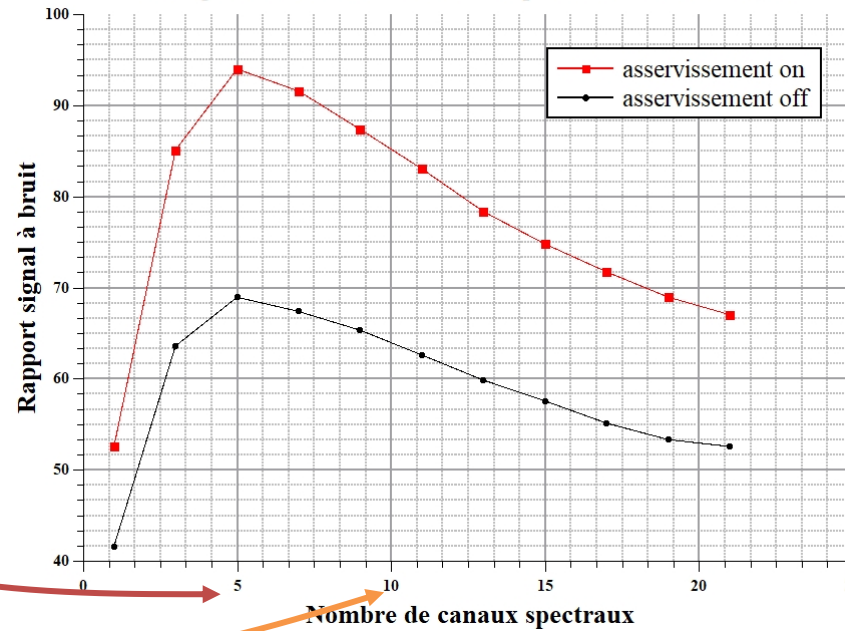
Franges sur le ciel - VEGA - 1000 trames de 0,2 s



Nombre de canaux spectraux

Amélioration du RSB

Franges sur le ciel - VEGA - RSB après 1000 trames de 0,2 s

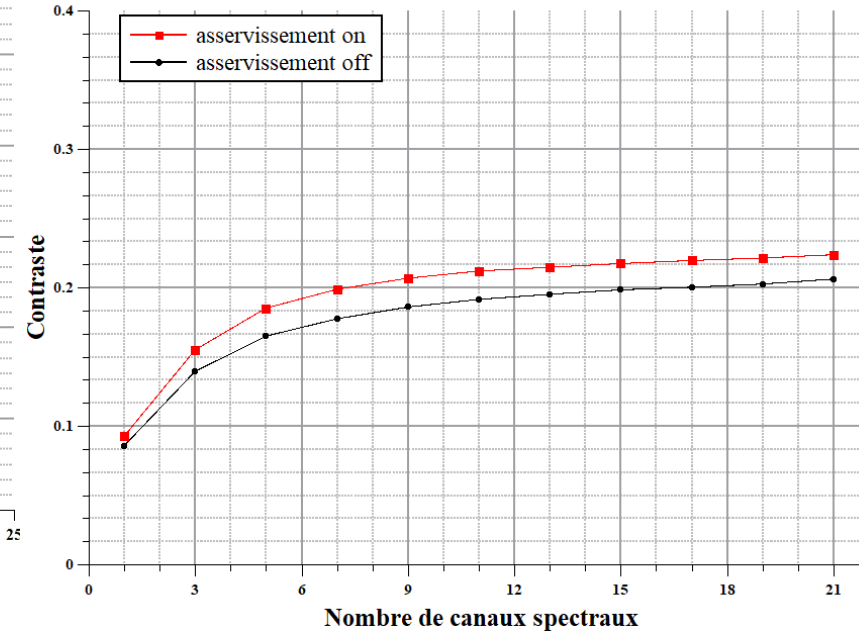


Turbulence atmosphérique à 810 nm
 → Influence moindre de l'asservissement
 (La turbulence à 3,5 μm sera bien plus faible)

Asservissement
Sans asservissement

Amélioration du contraste

Franges sur le ciel - VEGA - Contraste après 1000 trames de 0,2 s



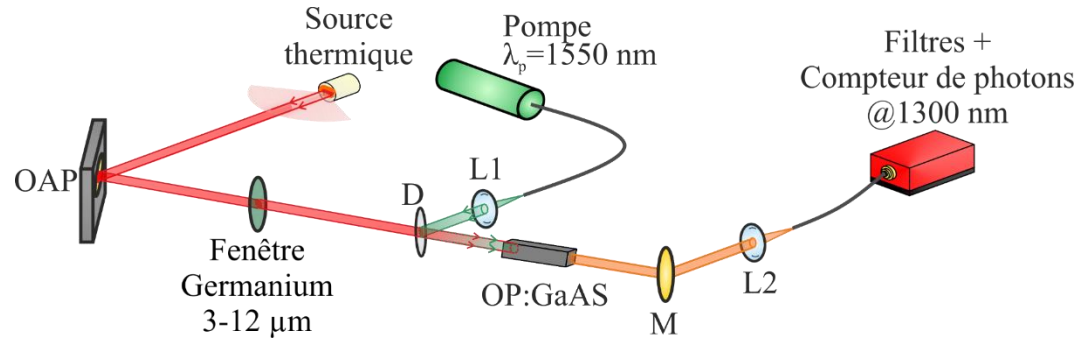
Franges sur le ciel à 810 nm (sans conversion de fréquences) ✓

Répétabilité d'une nuit à l'autre de la position de la LAR meilleure que 0,2 mm

Fibres optiques	En extérieur (majorité) + différence de longueur asservie
Fibres optiques de 240 m avec asservissement	Variation de longueur < à 2 mm (deux nuits consécutives)
	RMS de 3 nm ⇒ franges présentes dans chaque trame
Protocole	franges en interne puis sur le ciel ⇒ franges durant deux nuits consécutives
RSB (7 canaux spectraux, 1000 trames de 0,2 s)	92 avec asservissement > 69 sans asservissement
Contraste corrigé (servo on + correction photométrique) / contraste attendu = Rapport des contrastes	(contraste mesuré sur le ciel ÷ contraste instrumental) / contraste attendu 32% / 62% = 52 % (turbulence atmosphérique) (Vega)

Première étape pour le projet ALOHA et le futur interféromètre kilométrique fibré du réseau de télescopes CHARA

ALOHA à 10 μm



Sortie à 1340 nm
Vers les détecteurs

